

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOHANNA BEATRÍZ PRIETO GARZÓN

DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES POR  
COMPARAÇÃO DIRETA DE DADOS MULTI-TEMPORAIS DE SISTEMAS LIDAR

CURITIBA

2016

JOHANNA BEATRÍZ PRIETO GARZÓN

DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES POR  
COMPARAÇÃO DIRETA DE DADOS MULTI-TEMPORAIS DE SISTEMAS LIDAR

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Ciências  
Geodésicas, no Curso de Pós-Graduação em  
Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra,  
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado.

CURITIBA

2016

---

G245d

Garzón, Johanna Beatriz Prieto

Detecção e classificação de alterações de edificações por comparação direta de dados multi-temporais de sistemas Lidar / Johanna Beatriz Prieto Garzón. – Curitiba, 2016.

115 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2016.

Orientador: Álvaro Muriel Lima Machado .

Bibliografia: p. 113-115.

1. Construção civil – Inspeção. 2. Dados de raster. 3. Dados vetoriais. 4. Sistema Lidar. I. Universidade Federal do Paraná. II. Machado, Álvaro Muriel Lima. III. Título.

CDD: 690.21

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

JOHANNA BEATRIZ PRIETO GARZÓN

“DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES POR  
COMPARAÇÃO DIRETA DE DADOS MULTI-TEMPORAIS DE SISTEMAS LIDAR”

Dissertação nº 297 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado  
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Hideo Araki  
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 27 de julho de 2016.

## **AGRADECIMENTOS**

Os meus sinceros agradecimentos vão para todos os que contribuíram para a realização desta pesquisa:

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná - CPGCG, pela aceitação em um ótimo curso;

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos LACTEC), maiormente pela oportunidade de atuar como pesquisadora, pelo estímulo investigativo e pelos recursos disponibilizados no projeto;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelos subsídios para a importação, previstos pela Lei 8010/90, L.I. 12 / 1846474-1.

Ao Professor Álvaro Lima, pela orientação, disposição e colaboração.

Ao Professor Jorge Centeno, pelo conhecimento seguro, por sempre ter animado e colaborado.

Ao Professor Hideo Araki, pela ajuda e dedicação nesse trabalho.

Aos colegas e amigos do CPGCG em especial ao grupo de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, pelas discussões, sugestões e troca de ideias que assistiram meu trabalho.

Aos colegas e amigos dos Institutos LACTEC, especialmente a Fabiano Scheer pelo apoio e paciência no desenvolvimento desta pesquisa.

A meus amigos Mara, AnaLuiza, Jéssica e Sammy por todo o carinho.

E por último, mas não menos importante e significativo, a minha família a quem além dedico este trabalho; meus pais Mario e Beatriz, minhas irmãs Eliana e Paola, meus irmãos Mario e Rolando e a minhas adoradas sobrinhas Juanita e Mia Salomé. A todos eles que com seu amor me lembraram nos dias de aflição que o esforço se vê na gloria das metas e sonhos alcançados.

## RESUMO

A detecção de mudanças de edificações, inicial e tradicionalmente feita empregando dados obtidos ou transformados em formatos raster, neste trabalho, realiza-se diretamente com tecnologia LIDAR pela importância da informação de elevação contida nos dados originais. Com esta perspectiva, são identificadas, classificadas e quantificadas alterações de edificações em duas áreas de estudo mapeadas com dois sensores LIDAR, usando como estratégia a comparação direta das nuvens de pontos multi-temporais obtidas nos mapeamentos. O processo começa com a correção dos erros no registro das nuvens de pontos para após serem aplicados dois métodos de detecção: o primeiro por determinação de diferenças altimétricas pela subtração de Modelos Digitais de Superfície - MDS gerados para cada conjunto de dados, denominado método indireto devido à transformação dos dados em raster. Após, com o reconhecimento prévio das alterações, é desenvolvido um segundo método de tipo vetorial por determinação de distâncias de ponto a plano entre as mesmas nuvens de pontos, denominado método direto. Associa-se uma classificação às mudanças detectadas, definida como “construção nova” e “demolição”, a qual é verificada com o apoio de aerofotografias e levantamentos em campo. Assim, nesta fase surge uma classificação complementar definida como “construção temporária”. Na comparação e análise dos resultados, ao avaliar a quantificação das edificações detectadas, obteve-se em ambos os métodos um importante cenário sobre as localizações de tais edificações e, ao estimar os atributos altura e área, determinou-se melhor acurácia com o método direto. Conclui-se que os dois métodos são ferramentas eficientes para o seguimento da dinâmica imobiliária através de diferentes intervalos de tempo e que como principal dificuldade se encontra o discernimento das construções quando houver presença de vegetação, pelo qual, recomenda-se finalmente, a remoção deste elemento antes das análises dos dados para melhor refinamento nos resultados.

**Palavras chave:** LIDAR, detecção de alterações, edificações, raster e vetor.

## ABSTRACT

Building change detection, initially and traditionally through data obtained or transformed in raster formats, in this study was performed directly through the LIDAR technology, in view of the importance of elevation information contained in the original data. From this perspective, building changes in two study areas mapped with two LIDAR sensors were identified, classified and quantified, using as a strategy the direct comparison of multi-temporal point clouds obtained in the mappings. The process began with error correction in the registered point clouds and the subsequent application of two detection methods: the first, to determine altimetric differences by the subtraction of Digital Surface Models - DSM generated for each data set, named indirect method due to data transformation in raster. Then, from the previous change recognition, a second vector-type method was developed by determining point-to-plane distances between the same point clouds, named the direct method. A classification was assigned to the detected changes, defined as "new construction" and "demolition", which was verified with the support of aerial photographs and field surveys. Thus, at this stage a complementary classification defined as "temporary construction" emerged. The comparison and analysis of the results showed that, when evaluating the quantification of the detected buildings, an important scenario of building location was obtained through both methods and, when estimating height and area, higher accuracy was obtained with the direct method. Conclusion: the two methods are efficient tools for the follow-up of the real estate dynamics through different time intervals, and a major difficulty is the identification of constructions where vegetation is present. Finally, vegetation removal techniques are recommended before data analysis for better refinement of results.

**Keywords:** LIDAR, change detection, buildings, raster and vetor.

## RESÚMEN

La detección de cambios de edificaciones, inicial y tradicionalmente hecha empleando datos obtenidos o transformados en formatos raster, en este trabajo, se realiza directamente con tecnología LIDAR por la importancia de la información de elevación contenida en los datos originales. Con tal perspectiva, son identificadas, clasificadas y cuantificadas alteraciones de edificaciones en dos áreas de estudio mapeadas con dos sensores LIDAR, usando como estrategia la comparación directa de las nubes puntos multi-temporales obtenidas en los mapeamientos. El proceso comienza con la corrección de los errores en el registro de las nubes de puntos para después ser aplicados dos métodos de detección: el primero por determinación de diferencias altimétricas por la substracción de Modelos Digitales de Superficie - MDS generados para cada conjunto de datos, denominado método indirecto debido a la transformación de los datos en raster. Luego, con el reconocimiento previo de las alteraciones, es desarrollado un segundo método de tipo vectorial por determinación de distancias de punto a plano entre las mismas nubes de puntos, denominado método directo. Se asocia una clasificación a los cambios detectados, definida como "construcción nueva" y "demolición", la cual es verificada con el apoyo de aerofotografías y levantamientos en campo. Así, en esta fase surge una clasificación complementaria definida como "construcción temporal". En la comparación y análisis de los resultados, al evaluar la cuantificación de las edificaciones detectadas, se obtuvo en ambos métodos un importante escenario sobre las localizaciones de tales edificaciones y, al estimar los atributos altura y área, se determinó mejor precisión con el método directo. Se concluye que los dos métodos son herramientas eficientes para el seguimiento de la dinámica inmobiliaria a través de diferentes intervalos de tiempo y que como principal dificultad se encuentra el discernimiento de las construcciones cuando hay presencia de vegetación, por lo cual, se recomienda finalmente, la remoción de este elemento antes de análisis de los datos para mejor refinamiento de los resultados.

**Palabras clave:** LIDAR, detección de cambios, edificaciones, raster y vector.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TECNOLOGIAS DE SISTEMAS DE PULSO: PULSO ÚNICO E MPiA .	21
FIGURA 2 - ALCANCE OPERACIONAL DO SISTEMA PEGASUS HD500 .....	22
FIGURA 3 - MECANISMOS E PADRÕES DE VARREDURA .....	24
FIGURA 4 - EXEMPLOS DE FREQUÊNCIAS DE VARREDURA .....	25
FIGURA 5 - ELEMENTOS NA DETERMINAÇÃO DO <i>FOOTPRINT</i> .....	27
FIGURA 6 - MODELOS DE RETORNOS POR EMISSÃO DE PULSOS LASER .....	28
FIGURA 7 - EFEITO DA ABERTURA DO PULSO LASER AO ATINGIR BORDAS .	29
FIGURA 8 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA LIDAR ALTM 2050 .....	30
FIGURA 9 - MODELOS DE GRADES .....	35
FIGURA 10 - TRIÂNGULOS DE DELAUNAY E CIRCUNCÍRCULOS ASSOCIADOS ..	36
FIGURA 11 - VETORES DO PLANO $\pi$ .....	39
FIGURA 12 - DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE UM PONTO A UM PLANO .....	40
FIGURA 13 - TIPOS DE LIMIARES NA SEGMENTAÇÃO POR LIMIARIZAÇÃO .....	43
FIGURA 14 - OPERAÇÕES BÁSICAS SOBRE CONJUNTOS .....	44
FIGURA 15 - ELEMENTOS ESTRUTURANTES MAIS USADOS NA MORFOLOGIA MATEMÁTICA .....	45
FIGURA 16 - DILATAÇÃO CALCULADA PARA DOIS CONJUNTOS A E B .....	45
FIGURA 17 - EROÇÃO CALCULADA PARA DOIS CONJUNTOS A E B .....	46
FIGURA 18 - APLICAÇÃO DAS TRANSFORMAÇÕES MORFOLÓGICAS .....	46
FIGURA 19 - EXEMPLO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS .....	49
FIGURA 20 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO .....	53
FIGURA 21 - DIAGRAMA DAS ETAPAS GERAIS DO TRABALHO .....	56
FIGURA 22 - TRAJETÓRIAS DAS LINHAS DE VOO DOS LEVANTAMENTOS EM PONTA GROSSA .....	58
FIGURA 23 - TRAJETÓRIAS DAS LINHAS DE VOO DOS LEVANTAMENTOS EM CURITIBA E CENTRO POLITÉCNICO .....	59
FIGURA 24 - FILTRAGEM DE PONTOS LIDAR .....	62
FIGURA 25 - DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS EM <i>CLOUDCOMPARE</i> .....	64
FIGURA 26 - DISTÂNCIAS EM <i>CLOUDCOMPARE</i> COM MODELO LOCAL .....	65
FIGURA 27 - COMPARAÇÃO DO REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2 .....	67

FIGURA 28 - PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO 2.....	70
FIGURA 29 - FLUXOGRAMA DA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS DE PONTO A PLANO .....	77
FIGURA 30 - ENVOLTÓRIOS CONVEXOS PARA UM CONJUNTO DE PONTOS LiDAR (X, Y).....	78
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO DA CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO NO REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1 .....	83
FIGURA 32 - REPRESENTAÇÃO DA CORREÇÃO DO ERRO POR DIFERENÇA DE SGR NO REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2...	85
FIGURA 33 - IMAGEM DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 1. ....	86
FIGURA 34 - MDS COM OS EXPERIMENTOS DA ÁREA DE ESTUDO 1 .....	86
FIGURA 35 - CENTRÓIDES DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 1 .....	87
FIGURA 36 - IMAGEM DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 2 .....	90
FIGURA 37 - MDS COM OS EXPERIMENTOS DA ÁREA DE ESTUDO 2. ....	90
FIGURA 38 - CENTRÓIDES DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 2 .....	91
FIGURA 39 - ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTO A.....	94
FIGURA 40 - ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTO B.....	95
FIGURA 41 - ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTO C.....	96
FIGURA 42 - VISTA DE TOPO DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2.....	98
FIGURA 43 - AEROFOTOGRAFIAS DA ÁREA DE ESTUDO 1 .....	101
FIGURA 44 - IMAGEM DE INTENSIDADE E ORTOFOTO DA ÁREA DE ESTUDO 2	102
FIGURA 45 - ALTERAÇÕES EM <i>CLOUDCOMPARE</i> DAS ÁREAS DE ESTUDO .	106

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO ALTM 2050.....	31
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO PEGASUS HD500.....	32
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO COMPARATIVAS ENTRE O ALTM 2050 E O PEGASUS HD500 .....	33
TABELA 4 - OPERAÇÕES BÁSICAS E OPERADORES MORFOLÓGICOS .....	47
TABELA 5 - CONFIGURAÇÕES DOS VOOS DOS SLISA UTILIZADOS PARA PONTA GROSSA.....	57
TABELA 6 - CONFIGURAÇÕES DOS VOOS DOS SLISA UTILIZADOS PARA CURITIBA E O CENTRO POLITÉCNICO .....	59
TABELA 7 - LINHAS DE VOO SELECIONADAS PARA A ÁREA DE ESTUDO 1. ...	60
TABELA 8 - LINHAS DE VOO SELECIONADAS PARA ÁREA DE ESTUDO 2.....	61
TABELA 9 - PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DOS VOOS .....	61
TABELA 10 - ÁREAS DOS RECORTES NAS ZONAS DE ESTUDO .....	62
TABELA 11 - RESULTADOS DA FILTRAGEM DE PONTOS.....	63
TABELA 12 - COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO .....	70
TABELA 13 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO .....	71
TABELA 14 - PARÂMETROS DAS GRADES REGULARES GERADAS NAS ÁREAS DE ESTUDO .....	73
TABELA 15 - RESULTADOS DAS COMPARAÇÕES NO SOFTWARE <i>TERRASOLID</i> DOS MODELOS DE SUPERFÍCIE PARA AS ZONAS DE PROVA.....	81
TABELA 16 - RESULTADOS NO SOFTWARE <i>CLOUDCOMPARE</i> DAS DISTÂNCIAS ENTRE AS NUVENS DE PONTOS DAS ZONAS DE PROVA.....	82
TABELA 17 - ESTATÍSTICAS DA COMPARAÇÃO DOS SOFTWARES NAS ZONAS DE PROVA.....	83
TABELA 18 - DIFERENÇAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO AJUSTADOS.....	84
TABELA 19 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE POSIÇÃO E ÁREA OBTIDAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 1 .....	88
TABELA 20 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE ALTURAS OBTIDAS PELO MÉTODO RASTER. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1 .....	89

TABELA 21 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE POSIÇÃO E ÁREA OBTIDAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 2 .....	92
TABELA 22 - RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE ALTURA OBTIDA PELO MÉTODO RASTER. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2 .....	92
TABELA 23 - ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS DO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1 .....	94
TABELA 24 - CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1 .....	96
TABELA 25 - ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS DO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2 .....	97
TABELA 26 - CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2 .....	100
TABELA 27 - VERIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES. ÁREA DE ESTUDO 1 .....	102
TABELA 28 - VERIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES. ÁREA DE ESTUDO 2 .....	103
TABELA 29 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS POR ALTURA. EXPERIMENTOS NAS ÁREAS DE ESTUDO.....	104
TABELA 30 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS POR ALTURA COM O SOFTWARE <i>CLOUDCOMPARE</i> .....	107
TABELA 31 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS POR ÁREA. EXPERIMENTOS NAS ÁREAS DE ESTUDO.....	107
TABELA 32 - ÁREAS VERDADEIRAS PARA A ÁREA DE ESTUDO 2 .....	109

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - EQM DA TRANSFORMAÇÃO ENTRE SGR .....	84
GRÁFICO 2 - DIFERENÇAS ENTRE OS MÉTODOS DE ESTUDO POR ALTURA ...	105
GRÁFICO 3 - DIFERENÇAS ENTRE OS MÉTODOS DE ESTUDO POR ÁREA ...	108
GRÁFICO 4 - DIFERENÇAS ENTRE AS ÁREAS OBTIDAS PELOS MÉTODOS DE ESTUDO E SUAS ÁREAS VERDADEIRAS. EXPERIMENTOS NO CENTRO POLITÉCNICO .....	110

## LISTA DE SIGLAS

AGL	- Above Ground Level
ALTM	- Airborne Laser Terrain Mapper
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange
EQM	- Erro Quadrático Médio
FOV	- Field of View
CPGCG	- Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
GNSS	- Global Navigation Satellite System
GPS	- Global Positioning System
IMU	- Inertial Measurement Unit
INS	- Inertial Navigation System
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LASER	- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	- Light Detection and Ranging
LMS	- LiDAR Mapping Suite
MDS	- Modelo Digital de Superfície
MDT	- Modelo Digital de Terreno
MPiA	- Multiple Pulses in Air
MSS	- Mapa de Separação de Superfícies
POS	- Position and Orientation System
PDI	- Processamento Digital de Imagens
PRF	- Pulse Repetition Frequency / Rate
REALM	- Results of Airborne Laser Mapping
SAD 69	- South American Datum 69
SLSA	- Sistema Laser Scanner Aerotransportado
SGR	- Sistema Geodésico de Referência
SW	- Swath Width
TIN	- Triangulated Irregular Network
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UTM	- Universal Transverse Mercator
WGS 84	- World Geodetic System 84

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	16
1.2. OBJETIVOS PROPOSTOS .....	18
<b>1.2.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>18</b>
1.3. JUSTIFICATIVA.....	19
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
2.1. SISTEMA LIDAR.....	20
<b>2.1.1. Componentes e parâmetros principais dos Sistemas LIDAR.....</b>	<b>20</b>
2.1.1.1. Unidade de medição laser .....	20
2.1.1.2. Sistema de varredura .....	23
2.1.1.3. Unidade de navegação .....	30
2.2. EQUIPAMENTOS EM SISTEMAS LIDAR .....	31
<b>2.2.1. Sistema ALTM 2050 .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.2. Sistema ALTM Pegasus HD500 .....</b>	<b>32</b>
2.3. MODELAGEM DE PONTOS LIDAR .....	33
<b>2.3.1. Modelo de grade regular retangular .....</b>	<b>34</b>
2.3.1.1. Geração de uma grade regular retangular.....	34
<b>2.3.2. Modelo de grade irregular triangular - TIN .....</b>	<b>35</b>
2.3.2.1. Triangulação de Delaunay .....	35
<b>2.3.3. Distâncias entre pontos LIDAR .....</b>	<b>38</b>
2.4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	42
<b>2.4.1. Segmentação de imagens.....</b>	<b>42</b>
<b>2.4.2. Morfologia matemática.....</b>	<b>43</b>
<b>2.4.3. Rotulação de imagens por componentes conexas .....</b>	<b>48</b>
2.5. DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES .....	49
<b>3. ÁREAS E MATERIAIS .....</b>	<b>52</b>
3.1. ÁREAS DE ESTUDO.....	52
<b>3.1.1. Área de Estudo 1. Cidade de Ponta Grossa .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.2. Área de Estudo 2. Centro Politécnico da UFPR - Curitiba .....</b>	<b>52</b>

3.2. RECURSOS UTILIZADOS .....	54
<b>3.2.1. Dados LIDAR e aerofotografias .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.2. Softwares para o processamento de dados LIDAR .....</b>	<b>54</b>
3.2.2.1. Software LIDAR Mapping Suite (LMS) .....	54
3.2.2.2. Software para o processamentos dos dados LIDAR .....	55
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>56</b>
4.1. FASE PRELIMINAR.....	57
<b>4.1.1. Obtenção dos dados brutos LIDAR e parâmetros dos voos .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1.2. Extração dos pontos LIDAR das linhas de voo .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3. Obtenção e registro das nuvens de pontos .....</b>	<b>60</b>
4.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	62
<b>4.2.1. Recorte e filtragem das áreas de estudo .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.2. Comparação de referenciais das nuvens de pontos .....</b>	<b>63</b>
4.2.2.1. Correção do erro sistemático para o registro das nuvens de pontos.....	67
4.2.2.2. Transformações entre Sistemas Geodésicos de Referência - SGR.....	67
4.3. MÉTODOS PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES .....	72
<b>4.3.1. Detecção de alterações pelo método raster .....</b>	<b>72</b>
4.3.1.1. Determinação das formas e áreas dos objetos .....	75
<b>4.3.2. Detecção de alterações pelo método vetorial .....</b>	<b>76</b>
4.3.2.1. Segmentação e determinação das áreas das alterações .....	78
<b>4.3.3. Classificação das alterações detectadas .....</b>	<b>80</b>
<b>4.3.4. Comparação dos métodos.....</b>	<b>80</b>
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
5.1. REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS.....	81
<b>5.1.1. Correção do erro sistemático .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1.2. Transformação entre os Sistemas Geodésicos de Referência.....</b>	<b>83</b>
5.2. DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES.....	85
<b>5.2.1. Alterações de edificações detectadas pelo método Raster .....</b>	<b>85</b>
5.2.1.1. Área de estudo 1. Cidade de Ponta Grossa .....	85
5.2.1.2. Área de estudo 2. Centro Politécnico .....	89
<b>5.2.2. Alterações de edificações detectadas pelo método Direto.....</b>	<b>93</b>
5.2.2.1. Experimentos na área de estudo 1 .....	93
5.2.2.2. Experimentos na área de estudo 2 .....	97



5.3. VERIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES	100
5.3.1. Edificações dos experimentos na área de estudo 1 .....	101
5.3.2. Edificações dos experimentos na área de estudo 2 .....	102
5.4. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS .....	104
5.4.1. Comparação por altura das alterações das edificações .....	104
5.4.1.1. Comparação com distâncias obtidas em <i>CloudCompare</i> .....	105
5.4.2. Comparação por área das alterações das edificações .....	107
6. CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....	111
7. REFERÊNCIAS .....	113

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A modificação da paisagem é permanentemente investigada até mesmo como resposta à influência antropogênica nas mudanças globais. A urbanização, por exemplo, considera-se como um fator antrópico de grande impacto, cujo crescimento acelerado vem gerando as grandes transformações do espaço em suas diferentes escalas, mundial, regional ou local. Daí, uma constante preocupação na gestão e monitoramento dos ambientes urbanos reside na detecção de mudanças na cobertura e no uso do solo.

De acordo com Rymasheuskaya (2007), uma das principais aplicações do Sensoriamento Remoto é o estudo da cobertura e uso do solo, baseado em identificação de mudanças por análises multi-temporais. O uso comparativo de informações adquiridas em diferentes épocas possibilita obter conclusões diferenciadas das mutações espaciais de uma região ao longo de um período determinado. Assim, em regiões urbanizadas onde as edificações compõem o elemento da cena com maior importância, a detecção de suas alterações, por dados multi-temporais, apresenta-se de grande utilidade em temáticas como cadastro técnico, dinâmica imobiliária, expansão urbana, ou planejamento e política urbana.

As primeiras pesquisas se basearam na comparação de distintos tipos de dados como mapas topográficos, aerofotografias, e ortoimagens principalmente. Para Mas (1999) a detecção de alterações, a partir de imagens, pode ser classificada em três grupos diferenciados que vão de acordo com os procedimentos aplicados e com as técnicas de análises utilizadas. Mas (1999) classifica num primeiro grupo a melhoria da imagem, que inclui técnicas de combinação matemática de imagens de diferentes datas como diferenciação por subtração de bandas e diferenciação pelo índice de vegetação, métodos de transformação tais como a análise seletiva de componentes principais e a análise vetorial de diferenças espectrais; num segundo grupo se encontra a classificação direta de imagens multi-temporais que inclui métodos de classificação supervisionada e não supervisionada e a diferenciação posterior à classificação; e num terceiro grupo a combinação da melhoria da imagem com a comparação posterior à classificação.

Após, com a disseminação dos Sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*), os estudos para detectar alterações de edificações passaram à integração de dados obtidos por imagens com os obtidos por sensores LIDAR. As investigações utilizando esta tecnologia foram iniciadas por Murakami et al. (1999), cujo estudo surgiu da necessidade da minimização dos erros de omissão ou de comissão nos resultados na detecção das mudanças de edificações, os quais se apresentavam com certa frequência nos métodos anteriores.

Embora seja verdade que, a partir do uso combinado do LIDAR com imagens, acrescentaram-se aplicações nas temáticas relacionadas, nos últimos anos as pesquisas desenvolvidas por autores como Hebel et al. (2011), Korzeniowska e Pfeifer (2014) são efetuadas por comparações diretas entre dados LIDAR. O significativo destas comparações é preservar toda a informação possível original dos sensores, como os valores de elevação e de intensidade do pulso, importantes para determinar tamanho e volume das construções, ou diferenciar vegetação de construções, para citar um exemplo. Nesse sentido, para efetuar uma comparação de dois conjuntos de pontos LIDAR de uma mesma área, o problema pode ser descrito como encontrar pontos inseridos ou excluídos em um conjunto referência para reconhecer e classificar as mudanças correspondentes com edificações. Para isto, neste trabalho se apresenta a comparação entre os dados LIDAR multi-temporais adquiridos para áreas urbanas mapeadas com os sensores ALTM 2050 e Pegasus HD500 pertencentes aos Institutos LACTEC e fabricados pela empresa Optech Inc. A detecção está baseada na aplicação de dois métodos: um método de transformação dos dados em raster ou método indireto e um método admitido como vetorial ou direto, desenvolvido para não desconsiderar a informação original de altura na transformação.

Espera-se com este trabalho obter cenários estatísticos e espaciais que indiquem uma quantificação com alta precisão das mudanças associadas a edificações, assim como apontar soluções que minimizem os erros derivados da aplicabilidade dos métodos de detecção tradicionais.

## 1.2. OBJETIVOS PROPOSTOS

### 1.2.1. **Objetivo Geral**

Detectar, classificar e quantificar alterações de edificações em ambientes urbanos por comparação entre nuvens de pontos LIDAR multi-temporais.

### 1.2.2. **Objetivos Específicos**

1. Detectar alterações entre nuvens de pontos de áreas urbanas mapeadas com ambos os sensores LIDAR ALTM 2050 e Pegasus HD500 pelo método raster.
2. Detectar alterações entre nuvens de pontos de áreas urbanas mapeadas com ambos os sensores LIDAR ALTM 2050 e Pegasus HD500 pelo método direto.
3. Classificar as alterações detectadas pelos métodos raster e direto e analisar estas classificações.
4. Quantificar e avaliar os métodos raster e direto para detecção e classificação de alterações em edificações pela comparação dos atributos geométricos de área e altura.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

Imagens especializadas como as aerofotografias ou de satélite proveem informações espaciais importantes para identificar as variações que se produzem no território, e em áreas urbanas, consagram-se como a principal fonte de informação. No entanto, por sua natureza intrínseca de se constituir em formatos raster, estão restritas a análises dos dados em 2D com transformações dos valores de elevação.

Por sua parte, a detecção de alterações de edificações com tecnologia LIDAR, fonte original de dados vetoriais, permite uma contribuição a alguns dos problemas existentes nos métodos que utilizam dados a partir de imagens, derivados da perda da informação inicial quando é transformada em raster ou com o uso de técnicas de melhoria das imagens, por exemplo. Alguns destes problemas, como alturas ponderadas, falsas alterações de edificações por mudanças em vegetação ou comissões na detecção, e a omissão de alterações em lugares de difícil reconhecimento, como embaixo dos telhados, por exemplo, podem ser minimizados com a comparação direta de nuvens de pontos LIDAR.

Dessa maneira, com o uso de métodos vetoriais, em diferenças de superfície em áreas com alterações, leva-se em conta a informação original obtida pelos sensores, tornando possível melhorar a acurácia na localização do objeto, acrescentar o nível de detalhe, produzir resultados mais confiáveis de atributos como tamanho e forma, e até mesmo, projetar a possibilidade da utilização de um atributo ainda não muito explorado como é o volume das edificações, apontando assim para aplicações em 3D.

Uma das motivações do uso e comparação dos métodos propostos consiste em obter uma percentagem menor de erros de omissão ou de comissão na detecção das construções novas, principalmente.

Finalmente, a partir de uma visão de cadastro técnico urbano, o qual inclui atualizações das bases de dados de área construída, a acurácia na localização das alterações e do atributo tamanho, representa uma metodologia focada a minimizar custos e desgaste nos processos cadastrais convencionais, como os executados por inspeção manual ou por levantamentos em campo.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. SISTEMA LIDAR**

O Sistema LIDAR é uma tecnologia na área do Sensoriamento Remoto, também conhecido como Sistema Laser Scanner Aerotransportado (SLSA) ou como Sistema de Varredura Laser (SVL), usado em essência para mapear a superfície física da Terra. Esta tecnologia baseia-se em varredores ou perfiladores laser transportados em plataformas aéreas que emitem repetitivamente pulsos infravermelhos curtos em direção à superfície da Terra. Uma parte da energia do pulso é refletida de volta para o sensor onde é medido com um receptor óptico. Um temporizador mede o tempo de viagem, de ida e de volta do pulso retroespalhado. Assim, uma vez que o tempo de ida e volta é diretamente relacionado com a distância do sensor para o solo, a topografia da superfície da Terra pode ser reconstruída (WAGNER et al., 2004).

#### **2.1.1. Componentes e parâmetros principais dos Sistemas LIDAR**

Segundo Centeno (2004) os Sistemas LIDAR se constituem de três componentes principais: a unidade de medição laser, o sistema de varredura óptico-mecânico e a unidade de registro de medições de apoio, os denominados sistemas de navegação.

##### **2.1.1.1. Unidade de medição laser**

A unidade de medição laser é o componente que determina a distância entre o sensor e a superfície. Nesta unidade, o transmissor e o receptor do feixe do laser se dispõem de maneira que a trajetória do sinal recebido seja a trajetória do sinal transmitido. O transmissor gera um pulso retangular com uma largura de 4 a 15 ns. A diferença de tempo entre o pulso saindo do transmissor e sua detecção pelo receptor é proporcional à distância do retorno (SCHAER, 2010).

A medição direta consiste em determinar o tempo de viagem do pulso laser; o tempo entre sua emissão e sua recepção medido pelo sensor LIDAR. Logo, a medida da distância (*Range*) entre o sensor LIDAR e o objeto é calculada com base no tempo ( $dt$ ) e é dada por (BALTSAVIAS, 1999):

$$\text{Distância} = \frac{c * dt}{2} \quad (1)$$

onde,

$c$  é a velocidade da luz ( $299.792.458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \sim 3\cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

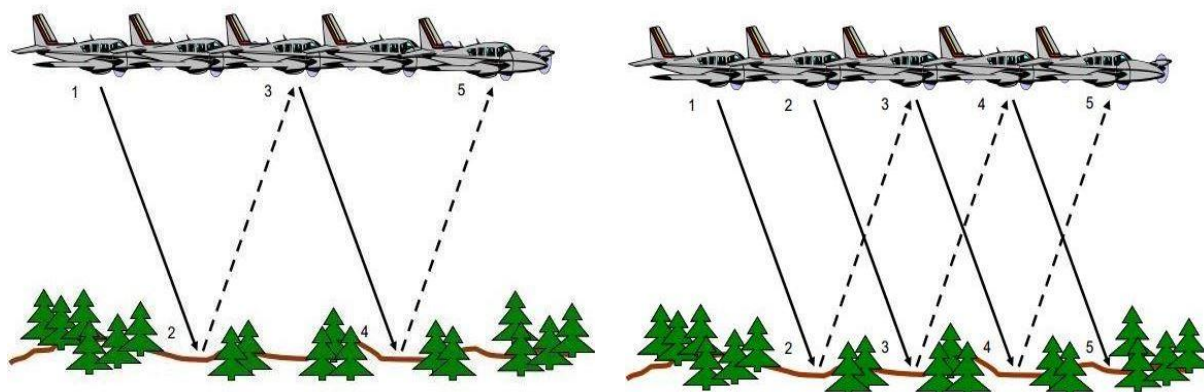
$dt$  é o tempo de emissão e recepção de um pulso

Nos últimos anos o avanço dos SLSA foi marcado pelo desenvolvimento de soluções tecnológicas que possibilitaram um rápido aumento das taxas de repetição ou emissão de pulsos (Frequência de Operação) dos sensores LIDAR. Uma solução foi a tecnologia de sistemas que emitem vários pulsos simultaneamente, chamada Múltiplos Pulsos no Ar (MPiA). A tecnologia MPiA disponibilizada a partir do ano 2007 permite que um segundo pulso seja emitido antes de receber o retorno do primeiro (FIGURA 1).

FIGURA 1 - TECNOLOGIAS DE SISTEMAS DE PULSO: PULSO ÚNICO E MPiA

a) Tecnologia de um único pulso

b) Tecnologia MPiA – Múltiplos Pulsos no Ar

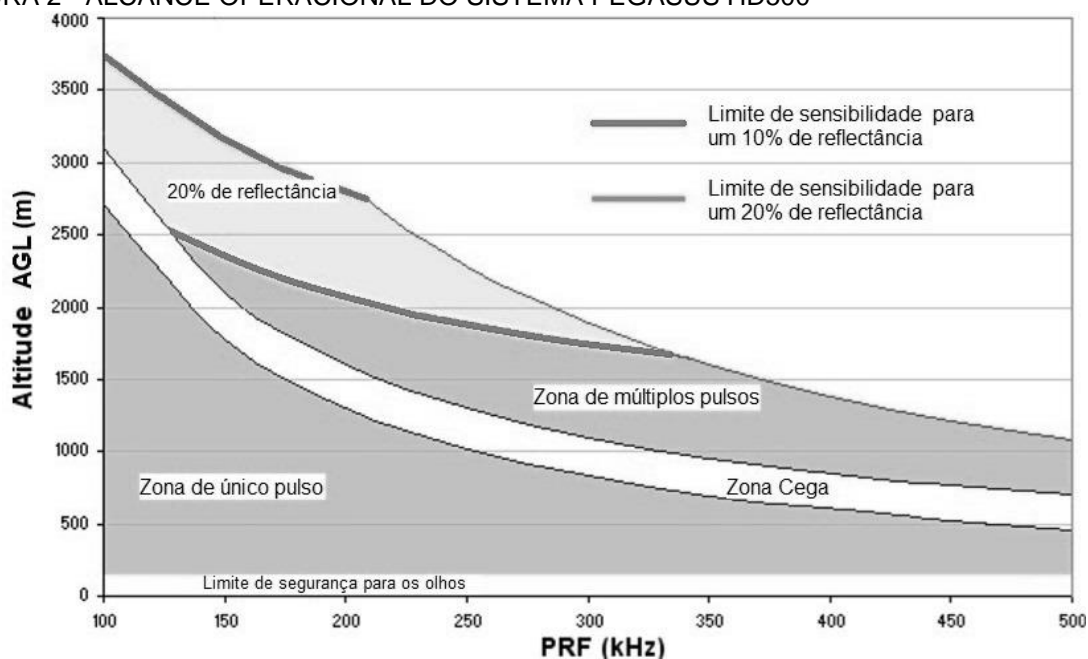


FONTE: BALTSAVIAS (2008)

A Frequência de Operação (Pulse Repetition Frequency - PRF) representa o número de pulsos laser emitidos por segundo. Atualmente alguns SLA dispõem de frequências PRF desde 500 kHz até 1000 kHz (OPTECH INC., 2015; LEICA, 2015).

A tecnologia MPiA permite aumentar a aquisição de dados em maiores alturas de voo para frequências PRF maiores, logo os efeitos da variação da altitude no terreno podem ser minimizados, exigindo menor sobreposição lateral entre as faixas, além da redução no tempo de voo principalmente no mapeamento de grandes áreas (TOTH, 2010). Para exemplificar o desempenho da PRF com a altura de voo, ilustra-se na Figura 2 o alcance operacional do Pegasus HD500 apresentando a relação entre PRF vs. Altitude AGL (altitude sobre o nível do solo).

FIGURA 2 - ALCANCE OPERACIONAL DO SISTEMA PEGASUS HD500



FONTE: OPTECH INC. (2012)

Na Figura 2 são mostradas as seguintes características e zonas para o Pegasus HD500 (OPTECH INC. 2012):

a) Limites do alcance

Definidos pelos intervalos mínimos e máximos de altura de voo para a utilização do sensor laser.



- Limite inferior: determinado pela distância de segurança para os olhos (*eye safety limit*).
- Limite superior: definido pelo alcance do sensor no modo MPiA. Distinguem-se dois limites de sensibilidade de reflectância do sensor; limites para 10% e para 20% (*Sensitivity Limit for 10% Reflectance*) e (*Sensitivity Limit for 20% Reflectance*).

b) Zona de único pulso (*Single Pulse Zone*)

É uma zona na qual o equipamento retorna o primeiro pulso antes da emissão do segundo. Nesse caso deve ser utilizado o modo de um único pulso (*single-pulse*).

c) Zona cega (*Blind Zone*)

É uma zona em que o intervalo de tempo para o primeiro e o segundo pulso é muito curto, podendo ocasionar falsos retornos no modo MPiA.

d) Zona de múltiplos pulsos (*2-Pulse Zone*)

Nessa zona o sensor pode fazer medições em modo MPiA.

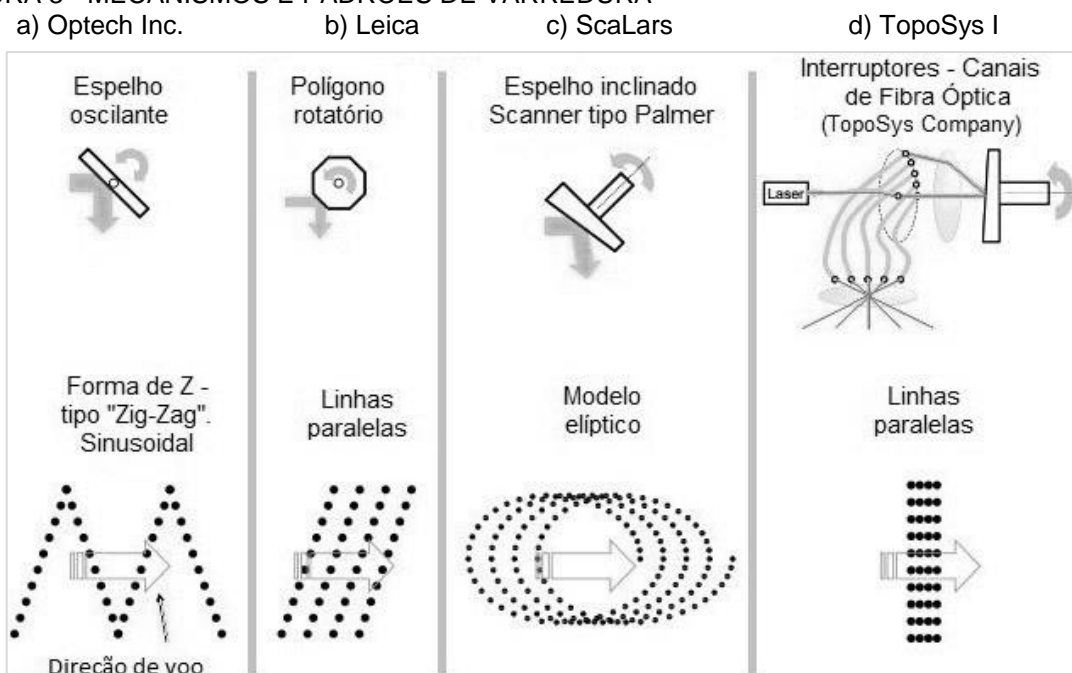
Outra alternativa para o aumento da PRF é a utilização de múltiplos sensores (canais) chamada tecnologia multicanal (*Multi-channel LiDAR Systems*). Segundo Toth (2010) as marcas líderes Optech Inc. e Leica introduziram esta tecnologia, onde o modelo ALTM Pegasus HD500 do Optech Inc. com seu sensor *Multi-channel* introduzido no mercado no ano 2012 se constitui num exemplo.

#### 2.1.1.2. Sistema de varredura

Na varredura, o pulso laser deve ser direcionado a múltiplos pontos no terreno para assim cobrir uma faixa. Para isto, os fabricantes desenham diversos mecanismos chamados espelho de varredura óptico-mecânico que produzem padrões de varredura diferentes.

Através dos espelhos de varredura ou do mecanismo óptico-mecânico adaptado no SLISA, consegue-se desviar o pulso laser para proporcionar uma varredura transversal da pista, enquanto que o movimento da aeronave proporciona a varredura ao longo da pista. A Figura 3 ilustra os mecanismos de varredura existentes com seus respectivos padrões de varredura adotados por algumas das empresas do mercado.

FIGURA 3 - MECANISMOS E PADRÕES DE VARREDURA



FONTE: Adaptado BALTSAVIAS (2008)

O ângulo de varredura total ( $\varphi_{\text{máx.}}$ ), chamado também campo de visão (*Field of View - FOV*) define a largura da faixa (*Swath Width - SW*). A largura da faixa ( $L$ ) apresentada na equação (2) é calculada em função da altura de voo e do  $\varphi_{\text{máx.}}$ . Estes parâmetros são configurados antes de efetuar o levantamento (SCHAER, 2010):

$$L = 2H \tan \frac{\varphi_{\text{máx.}}}{2} \quad (2)$$

onde,

$H$  é altura de voo (m)

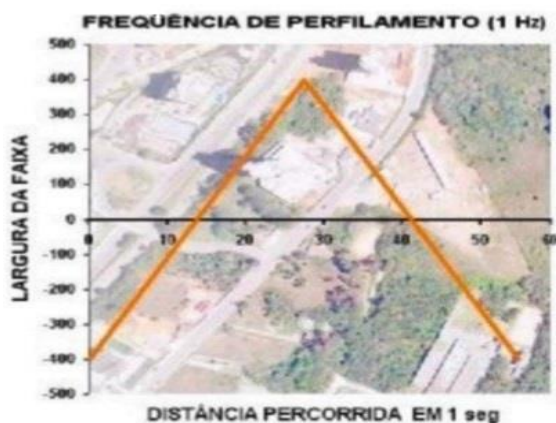
$\varphi_{\text{máx.}}$  é o ângulo de varredura total (graus)

A angulação máxima de varredura do sensor é limitada conforme as especificações de cada equipamento. Atualmente existem sensores com um ângulo total de varredura máximo de 75° como o modelo Leica ALS80 (LEICA, 2015).

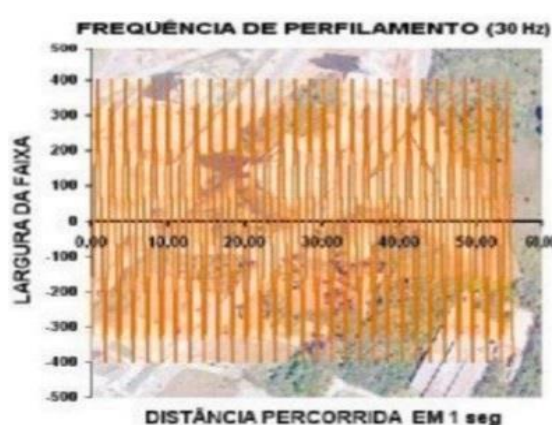
Outro parâmetro dos Sistemas LIDAR é a frequência de varredura ou de perfilamento determinada pela velocidade que oscila/gira o espelho de varredura. Para uma ótima configuração desse parâmetro, deve ser considerada a altura de voo, o ângulo de varredura, a velocidade da aeronave e a PRF. A Figura 4 ilustra duas frequências de varredura que representam em (a) uma frequência para dois perfis transversais e em (b) uma frequência para vários perfis transversais.

FIGURA 4 - EXEMPLOS DE FREQUÊNCIAS DE VARREDURA

a) Frequência baixa de 1 Hz



b) Frequência alta de 30 Hz



FONTE: Adaptado BRANDALIZE (2002)

O FOV, o padrão e frequência de varredura e a PRF combinados com a altura de voo e com a velocidade da aeronave influenciam diretamente na densidade dos pontos (pontos/m<sup>2</sup>) e sua distribuição na superfície mapeada (SCHAER, 2010). As formulações para determinar os espaçamentos entre os pontos, tanto no sentido de voo como no sentido transversal seguem na sequência (BALTSAVIAS, 1999):

a) Número de pontos por linha de varredura (pulsos/linha):

$$N = \frac{F}{2 * f_{sc}} \quad (3)$$

b) Espaçamento dos pontos no sentido transversal à linha de voo (m):

Depende do tipo de varredura. Nesse caso, a equação (4) está formulada para linhas bidirecionais ou ao longo dos perfis, por exemplo, uma varredura do tipo Zig - Zag (BRANDALIZE, 2002):

$$dX_{\text{across}} = \frac{2 * f_{sc} * L}{F} \quad (4)$$

c) Espaçamento dos pontos ao longo da faixa (m):

$$dX_{\text{along}} = \frac{v}{f_{sc}} \quad (5)$$

onde,

F é a taxa de emissão de pulsos ou PRF do sistema (kHz)

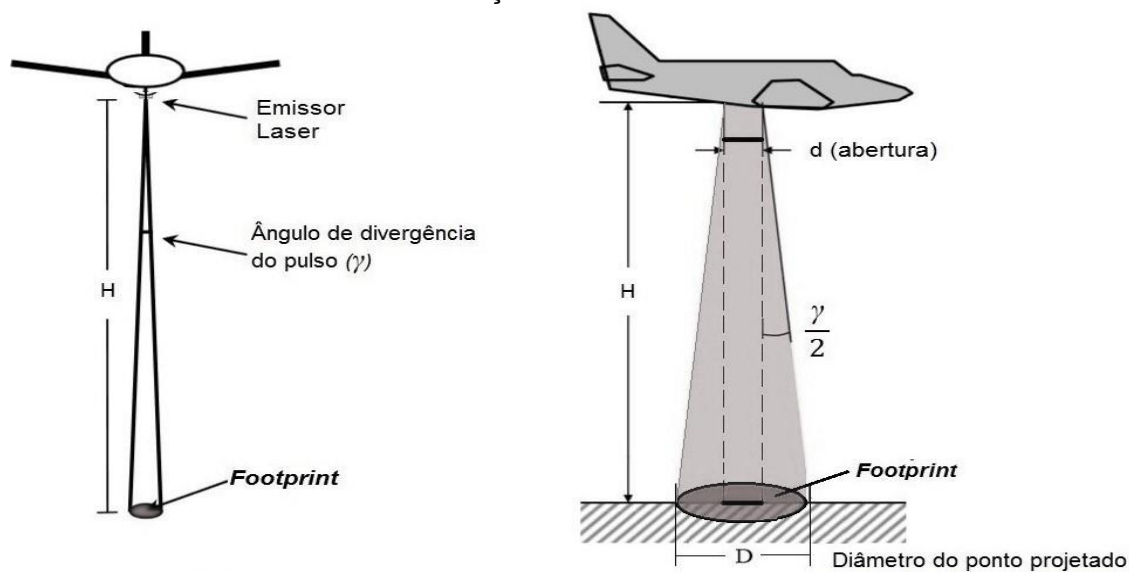
$f_{sc}$  é a frequência de varredura ou de perfilamento (Hz)

v é a velocidade da aeronave (km/h)

L é a largura da faixa transversal à linha de voo (m)

Um elemento relacionado à geometria e à aquisição de dados LIDAR é o *Footprint*. De acordo com Baltsavias (2008) o *footprint* corresponde à área de terreno iluminada pelo pulso laser, também chamado “diâmetro do ponto projetado”. O *footprint* depende do ângulo de divergência do pulso e da altura de voo, onde a divergência do pulso é uma característica física do pulso laser de aumentar seu diâmetro à medida que se propaga (BRANDALIZE, 2002). No caso ideal, o *footprint* corresponderia com um círculo, mas na realidade, tem um padrão mais irregular. Na Figura 5 na imagem da esquerda se apresentam os elementos gerais na determinação do *footprint* e em detalhe os elementos da abertura do feixe com uma geometria assumida para um círculo na imagem da direita.

FIGURA 5 - ELEMENTOS NA DETERMINAÇÃO DO FOOTPRINT



FONTE: Adaptado BALTSAVIAS (2008)

O diâmetro do ponto projetado ( $D$ ), assumindo um círculo, é calculado por (BALTSAVIAS, 2008):

$$D = d + 2H \cdot \tan(\gamma/2) \quad (6)$$

$$D \approx 2H \cdot \tan(\gamma/2) \quad (7)$$

sendo,

$d$  é o diâmetro de abertura do pulso laser (cm)

$H$  é a altura de voo (m)

$\gamma$  é o ângulo de divergência do pulso laser (mrad)

Como o ângulo de divergência é pequeno, o diâmetro do ponto projetado pode-se escrever:

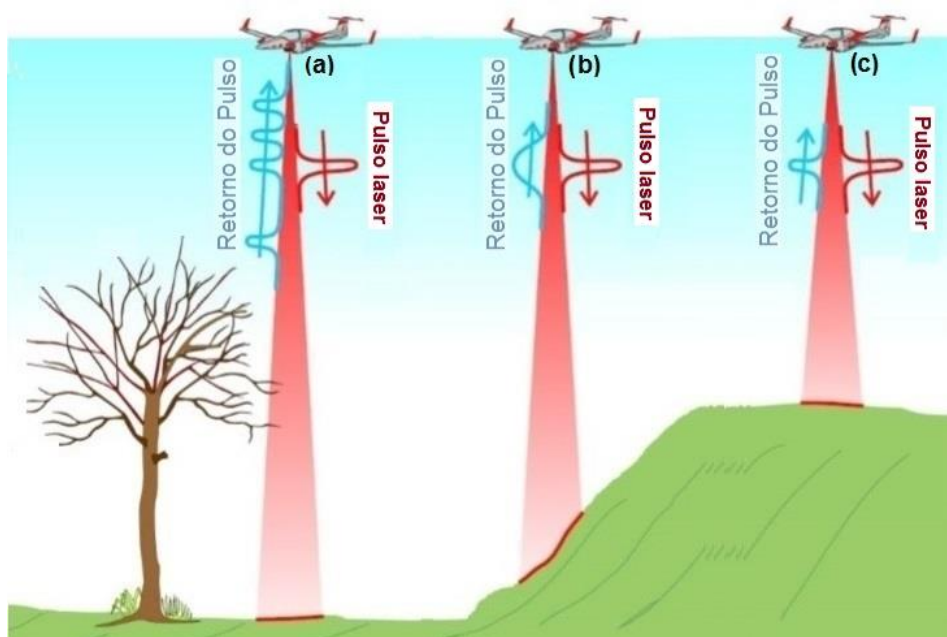
$$D = \gamma \cdot H \quad (8)$$

O comportamento do retorno do pulso varia com cada terreno ou superfície.

Para analisar este comportamento, na Figura 6 se ilustram modelos de um único retorno e de múltiplos retornos a partir de um pulso laser, representando os retornos do sinal detectáveis como um “pico” no sinal recebido. Dessa maneira, a Figura 6 representa as seguintes situações:

- a) Na imagem (a) o feixe atinge alguns alvos como os ramos da árvore antes de atingir o solo, observando-se quatro retornos em total: um para cada ramo da árvore e um último retorno quando o solo é atingido.
- b) Nas imagens (b) e (c) se representam retornos únicos no sinal recebido para superfícies diferentes. Observa-se que em (b) o retorno é mais extenso sobre a superfície inclinada que o retorno em (c) sobre a superfície plana, resultando este último parecido ao sinal/pulso laser emitido.

FIGURA 6 - MODELOS DE RETORNOS POR EMISSÃO DE PULSOS LASER



FONTE: Adaptado BALTSAVIAS (2008)

Para uma análise do *footprint* em superfícies com descontinuidades, deve-se considerar que a dimensão do *footprint* está sujeito à inclinação e à rugosidade da superfície mapeada, e que o objeto mínimo detectável dentro dele (*footprint*) não depende do tamanho do objeto, mas depende principalmente da sua reflectância.

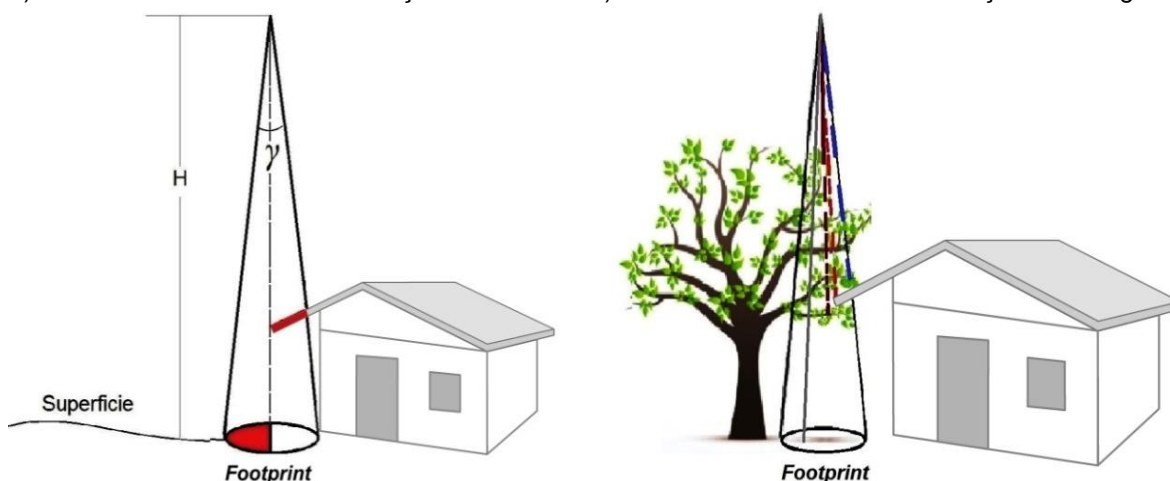
Sob estas considerações, um pulso retornado pode ser detectável se o objeto tem alta reflectância, mesmo que cubra uma área pequena dentro do *footprint*. Geralmente em superfícies planas com reflectância homogênea o sinal recebido é similar ao sinal emitido (BALTSAVIAS, 2008). Quando o pulso laser atinge uma borda, uma parte do pulso continua a se propagar e a parte incidente na borda registra um retorno. Assim, retornos múltiplos são obtidos geralmente em vegetação, em superfícies com descontinuidades bruscas como bordas de edificações e em objetos salientes como linhas de energia.

Na Figura 7 se exemplifica o efeito da abertura do pulso laser ao atingir bordas. Na imagem (a) se mostra um pulso laser que intercepta parcialmente a borda de uma edificação e parcialmente o solo. Algumas informações a partir dos retornos do pulso podem ser obtidas: o primeiro retorno indicará o ponto sobre o teto da edificação e o último retorno indicará o ponto sobre o solo (BRANDALIZE, 2002). Não obstante, em áreas com diferentes alvos como na imagem (b) que ilustra um pulso laser atingindo a borda de uma edificação com vegetação, as diferenças das reflexões do pulso não fornecem informações definitivas para distinguir as superfícies. Deve-se considerar um grau de incerteza entre as diferenças dos retornos, pois se pode confundir a vegetação com o teto da edificação, por exemplo. Neste caso, os valores de reflectância das superfícies fornecem informações valiosas para se distinguir tais superfícies.

FIGURA 7 - EFEITO DA ABERTURA DO PULSO LASER AO ATINGIR BORDAS

a) Efeito na borda de uma edificação

b) Efeito na borda de uma edificação com vegetação

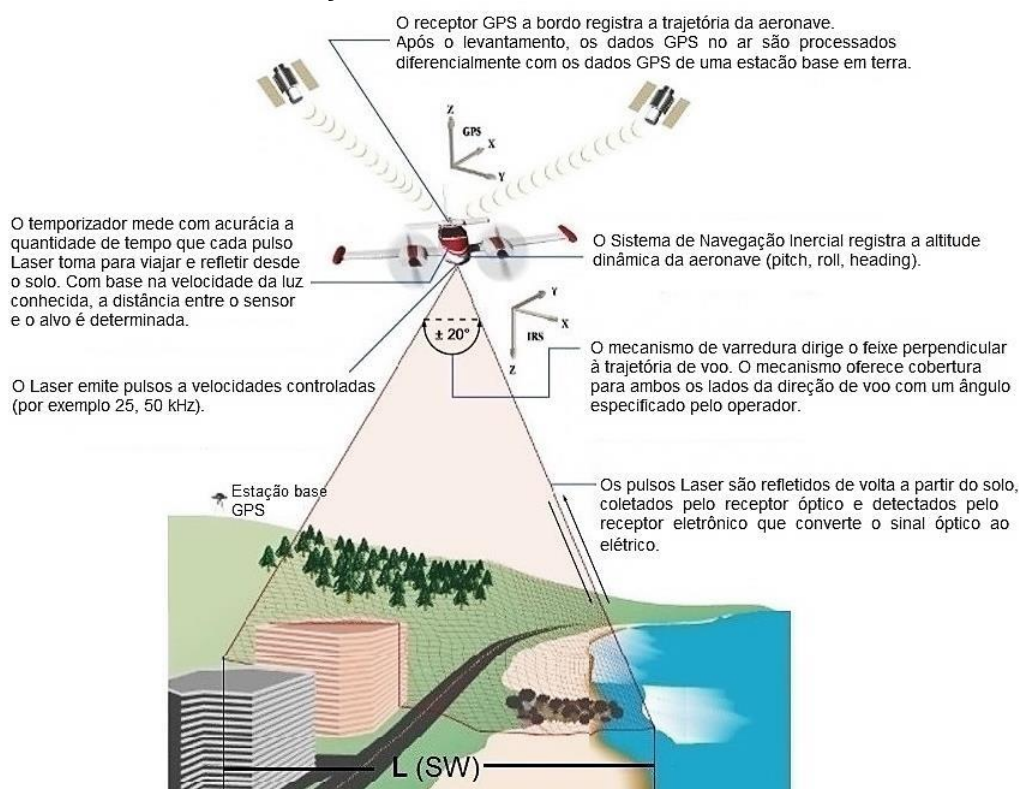


FONTE: O AUTOR (2016)

### 2.1.1.3. Unidade de navegação

Os SLSA estão integrados pelos sistemas de navegação, Sistema Global de Navegação por Satélites (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) e Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System - INS*) (MACHADO, 2006). Nos SLSA o georreferenciamento dos pontos é totalmente dependente do georreferenciamento direto para a orientação do sensor e os cálculos das coordenadas (SCHAER, 2010). Para determinar a posição de cada ponto alcançado pelo feixe laser na superfície da Terra, cada SLSA consta de dois dispositivos na unidade de navegação: um receptor GPS e uma Unidade de Medição Inercial (*Inertial Measurement Unit - IMU*). Para uma visão geral das operações básicas de um SLSA, na Figura 8 é mostrado o cenário operacional do modelo ALTM 2050.

FIGURA 8 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA LIDAR ALTM 2050



FONTE: Adaptado OPTECH INC. (2002b)

O produto final após o processamento pós-voo, como resultado da combinação dos dados obtidos pelos principais componentes que integram um SLSA, é a chamada nuvem de pontos (SCHAER, 2010).



## 2.2. EQUIPAMENTOS EM SISTEMAS LIDAR

Os ALTM (*Airborne Laser Terrain Mapper*) são instrumentos desenhados pela empresa Optech Inc. para efetuar levantamentos topográficos desde uma variedade de plataformas aerotransportadas.

### 2.2.1. Sistema ALTM 2050

Dentro dos componentes principais do modelo ALTM 2050 se incluem: a unidade do sensor laser infravermelho; o receptor óptico e eletrônico; um *chassis* para o alojamento do *Controle Rack*; um receptor GPS; e o POS (*Position and Orientation System*) para medir a altitude da aeronave (OPTECH INC., 2002b). Na Tabela 1 se resume as principais características de desempenho do ALTM 2050.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO ALTM 2050

Descrição do sistema	Características
Modelo do equipamento	ALTM 2050
Fabricante do equipamento	Optech Incorporated
Ano de fabricação	2002
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix – Optech Custom
Receptor GNSS	Novatel Millennium
Software da operação de voo	ALTM-NAV (Optech)
Software de processamento	REALM Survey Suite (Optech)
Frequência de operação (PRF)	50 kHz
Frequência de varredura	0 Hz a 70 Hz (depende do ângulo de varredura)
Ângulo de varredura total (FOV)	Variável de 0° a $\pm 40^\circ$
Tipo de coleta de dados	Modo Pulso (primeiro e último retorno do pulso)
Intensidade	2 retornos - Registro da Intensidade 8 bits
Divergência do pulso	Dual: 0.2 mrad ou 1.0 mrad
Comprimento de onda do laser	1064 nm (classe IV- FDA CFR 21)
Altura operacional	210 – 2.000 m (nominal)
Acurácia altimétrica	15 cm - 1 $\sigma$ para altitude de 1.200 m 25 cm - 1 $\sigma$ para altitude de 2.000 m
Acurácia planimétrica	1/2.000 x altitude, 1 $\sigma$ (60 cm para altitude de 1.200 m)
Largura da faixa mapeada (SW)	Variável de 0 a 0.72 x altitude (máx. – 1.440 m)
Câmara digital	Câmara de 4k x 4k pixels

FONTE: OPTECH INC. (2002a)

### 2.2.2. Sistema ALTM Pegasus HD500

O modelo ALTM Pegasus HD500 tem a combinação das duas tecnologias desenvolvidas para o aumento da PRF dos sistemas LIDAR: múltiplos pulsos no Ar - MPiA e um sistema multicanais pertencentes ao denominado Sistema Discreto.

O Sistema Discreto é um sistema equipado com dois canais de 250 kHz máx. de PRF cada um para o pulso laser. A informação é armazenada em discos rígidos removíveis de alta capacidade, devido ao grande espaço de memória necessário para o armazenamento e registro da informação. Além disso, conta com um componente para a digitalização da *Waveform*, chamada Unidade IWD (*Intelligent Waveform Digitizer*) ou Sistema *Digitizer*. A Tabela 2 apresenta algumas das características do Pegasus HD500.

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DO PEGASUS HD500

Descrição do sistema	Características
Modelo do equipamento	ALTM PEGASUS HD500
Fabricante do equipamento	Optech Incorporated
Ano de fabricação	2012
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix AV-POSView (Applanix Corporation)
Receptor GNSS	220-channel dual frequency GPS/GNSS/Galileo/L-Band
Software da operação de voo	Optech FMS Planner
Software de processamento	Optech LMS Digitizer Data Acquisition and Recording Program Digitizer Data Retrieval Program
Frequência de operação (PRF)	Variável 100 - 500 kHz
Frequência de varredura	Variável 0 - 140 Hz efetivo
Ângulo de varredura total (FOV)	Variável de 0° a $\pm 65^\circ$
Tipo de coleta de dados	Multipulso (múltiplos retornos) e modo <i>Full-Waveform</i>
Intensidade	Até 4 retornos de Intensidade para cada pulso, incluído ou último - Registro de Intensidade 12 bits
Divergência do pulso	0.25 mrad
Comprimento de onda do laser	1064 nm (classe IV- FDA CFR 21)
Altura operacional	300 – 2.500 m (nominal) (3.500 m operacional)
Acurácia altimétrica	< 5 - 15 cm, 1 $\sigma$ (12 cm para altitude de 1.000 m)
Acurácia planimétrica	1/5.500 x altitude, 1 $\sigma$ (18 cm para altitude de 1.000 m)
Câmara digital	Câmara de 5 megapixel (padrão)

FONTE: OPTech INC. (2015)

Por último, a Tabela 3 apresenta as principais características de desempenho comparativas entre os equipamentos ALTM 2050 e Pegasus HD500.

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO COMPARATIVAS ENTRE O ALTM 2050 E O PEGASUS HD500

Características	ALTM 2050	ALTM Pegasus HD500
Ano de fabricação	2002	2012
Altura operacional	300 – 2.000 m	300 – 3.500 m
Acurácia horizontal	50 cm para altitude de 1.000 m	18 cm para H de 1.000 m
Acurácia vertical	13 cm para altitude de 1.000 m	12 cm para H de 1.000 m
Ângulo de varredura total (FOV)	0 a $\pm 40^\circ$	0 a $\pm 65^\circ$
Frequência de operação (PRF)	50 kHz	500 kHz
Retornos	2 retornos (primeiro e último)	Infinitos retornos ( <i>Full-Waveform</i> )
Largura da faixa mapeada	Máxima de 1.455 m	Máxima de 4.460 m
Registro da Intensidade	8 bits	12 bits

FONTE: OPTECH INC. (2002a); OPTECH INC. (2015)

### 2.3. MODELAGEM DE PONTOS LIDAR

Uma nuvem de pontos LIDAR representa a superfície física da Terra com atributos tridimensionais (X, Y, Z), porém, com distribuição espacial de tais atributos não homogênea, pois são dados separados irregularmente. Com essa consideração, a modelagem de uma nuvem de pontos LIDAR se pode dar pela geração de um Modelo Digital de Terreno - MDT (*Digital Terrain Model - DTM*), pois este modelo descreve um dos elementos mais relevantes da superfície modelada como é a variação altimétrica (BOTELHO, 2007).

Originalmente o MDT foi o termo genérico empregado para modelamento matemático de superfícies composto por estruturas de dados (grades) e funções de interpolação (métodos), de forma que todo o conjunto represente o comportamento da superfície real (MITISHITA, 1997). Atualmente na prática, também são definidos os termos Modelo Digital de Superfícies - MDS (*Digital Surface Model - DSM*) e o advindo Modelo Digital de Superfícies Normalizado - MDSn (*normalized DSM - nDSM*). Assim, o MDS representa a superfície da Terra incluindo todos os objetos sobre a mesma, enquanto que o MDT representa a superfície do terreno sem tais objetos, é dizer, sem cobertura vegetal, edificações, etc.

O MDSn definido na equação (9) representa a altura dos objetos sobre a superfície da terra, obtido pela subtração do DTM a partir do MDS.

$$\text{MDSn} = \text{MDS} - \text{MDT} \quad (9)$$

Na geração de um MDT de dados LIDAR, segundo Silva et al. (2013), a estrutura de dados mais usada para representar uma superfície, dada a disponibilidade nos softwares de processamento de dados LIDAR, é a Grade Irregular Triangular (*Triangular Irregular Network - TIN*). Por outro lado, não existe consenso na literatura sobre a escolha do método mais adequado para interpolação de dados pontuais, o que pode ser feito usando diferentes métodos.

### **2.3.1. Modelo de grade regular retangular**

A grade regular retangular é um modelo digital que aproxima a superfície real através de um poliedro de faces retangulares, onde uma das considerações mais importantes para esta grade é o espaçamento a ser estabelecido entre seus elementos (retângulos), é dizer, a também chamada resolução espacial fixa (MITISHITA, 1997).

#### **2.3.1.1. Geração de uma grade regular retangular**

O processo de geração de uma grade regular retangular consiste em calcular os valores da cota Z de cada ponto da grade a partir do conjunto de amostras de entrada (NAMIKAWA et al., 2003). Este processo usa retângulos como elementos básicos e têm os atributos de:

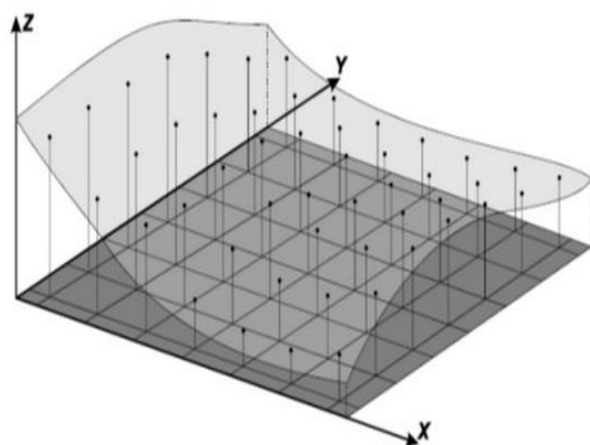
- a) Número de linhas e colunas
- b) Resolução horizontal e vertical (espaçamento da grade em X e em Y)
- c) Métodos de interpolação (cálculo do valor aproximado de elevação - Z)

### 2.3.2. Modelo de grade irregular triangular - TIN

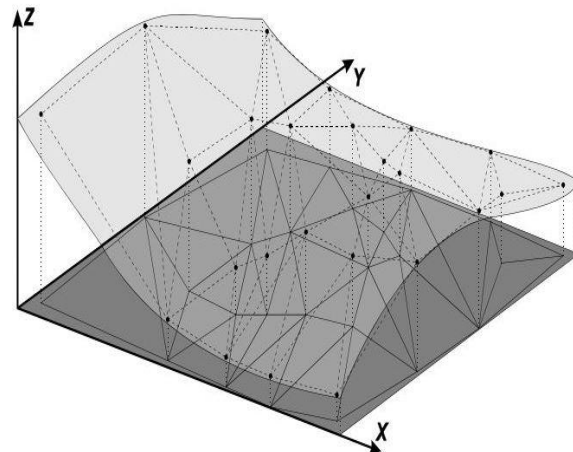
O modelo de grade irregular triangular - TIN é desenhado por um poliedro de faces triangulares onde os vértices dos triângulos são os pontos amostrados na superfície (MITISHITA, 1997) não sendo necessário o procedimento de estimativa utilizado na geração da grade regular, mas sim um tipo de ajuste de superfície (NAMIKAWA et al., 2003). De modo comparativo, na Figura 9 é representada a distribuição dos dados nos modelos de grade regular retangular e de grade TIN.

FIGURA 9 - MODELOS DE GRADES

a) Modelo de grade regular retangular



b) Modelo de grade Irregular Triangular - TIN



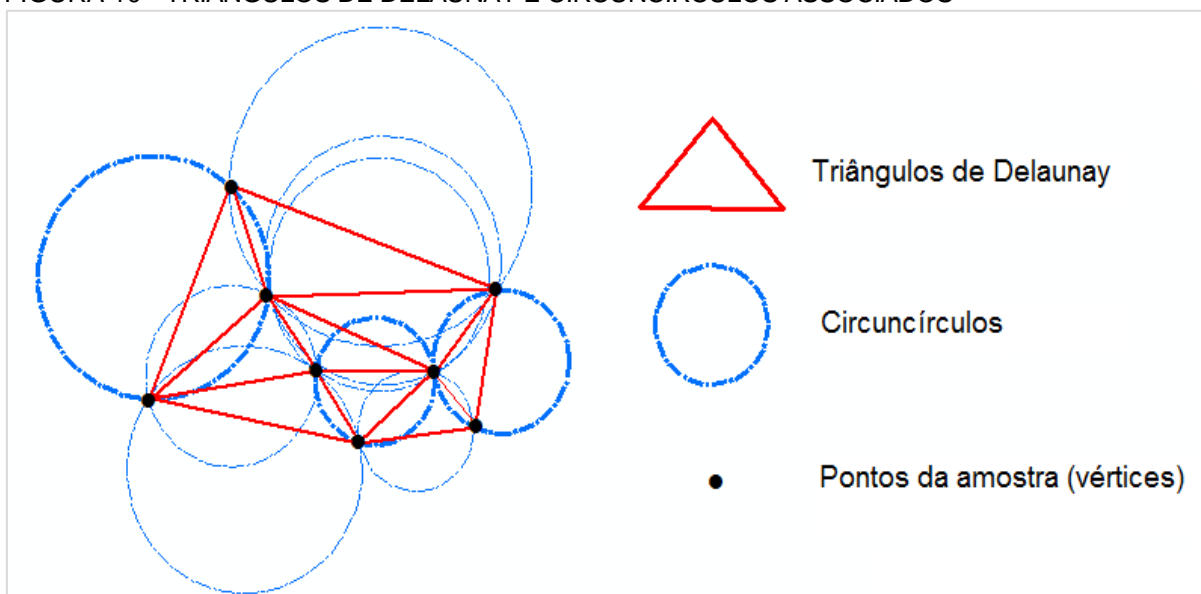
FONTE: NAMIKAWA et al. (2003)

#### 2.3.2.1. Triangulação de Delaunay

Uma triangulação consiste na interligação três a três dos pontos amostrados formando triângulos. Um método de triangulação define as regras para conectar pontos próximos. Apesar das diferentes triangulações possíveis de um mesmo conjunto de pontos e de que todas tenham o mesmo número de triângulos, a forma deles é muito importante, sendo o triângulo equilátero considerado como o triângulo ótimo e ideal. Deve-se então, escolher uma triangulação onde não haja abundância de triângulos excessivamente longos e afinados. Dessa maneira, a triangulação Delaunay se consolida como a triangulação que melhor satisfaz esta condição (MITISHITA, 1997).

A triangulação de Delaunay conecta os vértices dos triângulos baseado no critério dos círculos vazios, o qual afirma que na triangulação o circuncírculo de cada triângulo não contém nenhum outro ponto (vértice) (NAMIKAWA et al., 2003). O circuncírculo de um triângulo é o único círculo que passa pelos três vértices. Uma grande vantagem da triangulação de Delaunay está no agrupamento de triângulos com ângulos internos não muito agudos, aproximando-se do triângulo ideal (equilátero). Na Figura 10 representam-se os triângulos de Delaunay e os circuncírculos associados a cada ponto de um conjunto de pontos, com ressaltado de três circuncírculos para três triângulos de Delaunay.

FIGURA 10 - TRIÂNGULOS DE DELAUNAY E CIRCUNCÍRCULOS ASSOCIADOS



FONTE: ADAPTADO NAMIKAWA et al. (2003)

Pelas características dos dados LIDAR de possuir as informações de altura para cada um dos retornos do pulso laser, é possível obter produtos a partir das diferenças dos pulsos; onde os MDT derivados da filtragem do primeiro e do último pulso dos MDS são um exemplo de isto. Neste tipo de produto, os pontos classificados podem ser interligados para formar uma grade TIN ou servir de entrada no processo de interpolação para a geração de uma grade regular (CENTENO e MITISHITA, 2007).

No contexto de geração de MDS, Schaer (2010) apresenta uma série de fatores que influem na acurácia dos dados em modelos de altura. Além dos erros inerentes à obtenção dos dados pelos sensores LIDAR no georreferenciamento e na geração das nuvens de pontos, a classificação dos pontos do terreno tem um forte impacto na qualidade final dos MDT, como por exemplo, a influência da vegetação de alta densidade pela diminuição da capacidade do pulso laser de atingir o solo neste tipo de superfícies. Portanto, a densidade e a distribuição espacial dos pontos de terreno dependem da topografia e da cobertura do solo e uma classificação errônea pode influir diretamente nas alturas dos MDT. Por último, na interpolação, como etapa final na geração dos modelos de altura, a escolha do interpolador é determinante.

Considerando que os métodos de interpolação foram concebidos com base em levantamentos esparsos e pouco densos obtidos por outro tipo de dados como os fotogramétricos, uma nuvem de pontos LIDAR, longe disso, é caracterizada por uma alta densidade de pontos, motivo pelo qual existe pouca necessidade de interpolar valores para gerar MDS. A interpolação pode degradar os dados, suavizando excessivamente as bordas dos objetos presentes em um MDS. O caso mais frequente acontece nas regiões onde se apresentam oclusões causadas pelo ângulo de visada do sensor LIDAR, o qual é muito comum em áreas urbanas (CENTENO e MITISHITA, 2007).

Com vista à solução desta problemática, Araki (2005) desenvolveu uma metodologia para gerar MDS utilizando os valores originais dos dados; as coordenadas (X, Y, Z) e a intensidade dos dados referentes ao primeiro e último pulsos. O trabalho se realizou a partir de uma grade regular vazia cuja posição e valor de altura de cada ponto foi projetado. Nesta projeção foi definido o uso do primeiro retorno. Depois, os espaços vazios, onde o feixe laser não obteve reflexões ou não atingiu alvos como corpos de água ou regiões de oclusão, foram preenchidos. O preenchimento foi feito verificando inicialmente a existência de valores vizinhos; se existissem deviam satisfazer um critério de homogeneidade, que considerava tanto a diferença de elevação como o valor de intensidade, assim, a posição da grade foi preenchida com o valor correspondente à média dos vizinhos. Finalmente foi utilizada morfologia matemática com o operador “fechamento” (*closing*) para preencher regiões de bordas entre áreas não homogêneas.

### 2.3.3. Distâncias entre pontos LIDAR

Para a determinação das distâncias entre duas nuvens de pontos LIDAR são considerados os seguintes conceitos derivados da Geometria Analítica:

a) Distâncias de ponto a ponto (distância Euclidiana)

Sejam  $A(X_1, Y_1, Z_1)$  e  $B(X_2, Y_2, Z_2)$  dois pontos com suas coordenadas em um mesmo referencial; a distância entre os pontos A e B é o módulo do vetor  $\overrightarrow{AB}$ , isto é:

$$d(A, B) = |\overrightarrow{AB}| = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \quad (10)$$

b) Distâncias de ponto a plano

Um modo de relacionar os elementos geométricos ponto e plano em um sistema de coordenadas cartesianas no espaço é pela equação geral do plano. Considere-se:  $A(X, Y, Z)$  é um ponto conhecido pertencente ao plano  $\pi$ ,  $\vec{n}$  um vetor normal (ortogonal) ao plano  $\pi$  onde (STEINBRUCH e WINTERLE, 1987):

$$\vec{n} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k} \text{ com, } \vec{n} \neq (0, 0, 0) \quad (11)$$

Se  $\vec{n}$  é um vetor ortogonal ao plano  $\pi$ , também será ortogonal a qualquer vetor representado neste plano. Logo, se  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$  são vetores diretores de um plano  $\pi$  (vetores não nulos e não colineares) (FIGURA 11), tem-se:

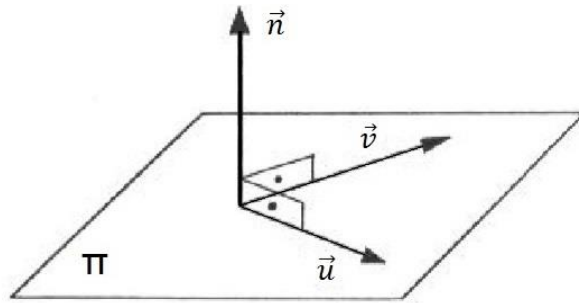
$$\vec{n} = \vec{u} \times \vec{v} \quad (12)$$

onde,

$\vec{u} = (r, s, t)$  com  $r, s, t$  os componentes do vetor  $\vec{u}$

$\vec{v} = (m, p, q)$  com  $m, p, q$  os componentes do vetor  $\vec{v}$



FIGURA 11 - VETORES DO PLANO  $\pi$ 

FONTE: STEINBRUCH e WINTERLE (1987)

O plano  $\pi$ , pode ser definido como o conjunto de todos os pontos  $P$  do espaço tais que o vetor  $\overrightarrow{AP}$  é ortogonal a  $\vec{n}$ :

$$\vec{n} \cdot \overrightarrow{AP} = 0 \quad (13)$$

Se  $P(X_0, Y_0, Z_0)$  é um ponto genérico do plano  $\pi$ ,  $P$  pertence a  $\pi$  se, e somente se, os vetores  $\overrightarrow{AP}$ ,  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  são linearmente dependentes, isto é:

$$\begin{bmatrix} X - X_0 & Y - Y_0 & Z - Z_0 \\ r & s & t \\ m & p & q \end{bmatrix} = 0 \quad (14)$$

desenvolvendo,

$$(X - X_0) \begin{bmatrix} s & t \\ p & q \end{bmatrix} \vec{i} - (Y - Y_0) \begin{bmatrix} r & t \\ m & q \end{bmatrix} \vec{j} + (Z - Z_0) \begin{bmatrix} r & s \\ m & p \end{bmatrix} \vec{k} = 0 \quad (15)$$

tendo em vista que,  $n = (a, b, c)$  e,

$$\overrightarrow{AP} = (X - X_0) \vec{i} + (Y - Y_0) \vec{j} + (Z - Z_0) \vec{k} \quad (16)$$

segue-se que a equação 15 é equivalente a:

$$a(X - X_0) + b(Y - Y_0) + c(Z - Z_0) = 0 \quad (17)$$

sendo,

$$a = \begin{bmatrix} s & t \\ p & q \end{bmatrix}, b = -\begin{bmatrix} r & t \\ m & q \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} r & s \\ m & p \end{bmatrix} \quad (18)$$

reescrevendo,

$$aX + bY + cZ - (aX_0 + bX_0 + cZ_0) = 0 \quad (19)$$

temos,

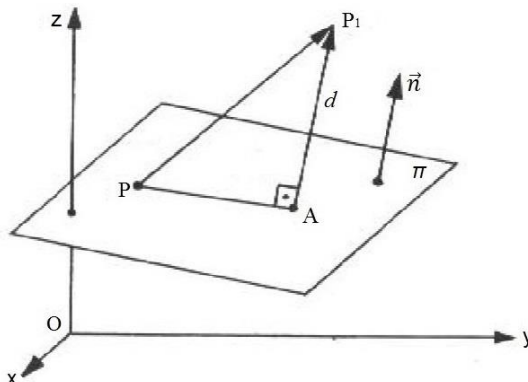
$$\pi = aX + bY + cZ + d = 0 \quad (20)$$

A equação 20 representa a equação geral do plano  $\pi$  onde,

$$d = - (aX_0 + bY_0 + cZ_0) \quad (21)$$

Dado um ponto  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$  e um plano  $\pi$ , a distância entre o ponto  $P_1$  e o plano  $\pi$ , indicada por  $d(P_1, \pi)$ , é definida como a menor distância possível entre  $P_1$  e um ponto do plano. O ponto do plano que se situa à menor distância de  $P_1$  é exatamente aquele que se encontra na interseção da reta passando por  $P_1$  que é perpendicular ao plano (BOULOS, 1987). Na Figura 12 se ilustram os componentes na determinação da distância de um ponto  $P_1$  a um plano  $\pi$ .

FIGURA 12 - DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE UM PONTO A UM PLANO



FONTE: STEINBRUCH e WINTERLE (1987)

A partir da Figura 12, define-se a distância de um ponto ( $P_1$ ) a um plano ( $\pi$ ) como o módulo da projeção ortogonal do vetor  $\overrightarrow{PP_1}$  sobre o vetor normal ( $\vec{n}$ ) ao plano  $\pi$ , denotado como (BOULOS, 1987):

$$d(P_1, \pi) = | \overrightarrow{AP_1} | = | \text{proj}_{\vec{n}} \overrightarrow{PP_1} | \quad (22)$$

Então, a projeção ortogonal do vetor  $\overrightarrow{PP_1}$  é:

$$| \overrightarrow{AP_1} | = | \text{proj}_{\vec{n}} \overrightarrow{PP_1} | = \left| \overrightarrow{PP_1} \cdot \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right| \quad (23)$$

como,

$$\overrightarrow{PP_1} = (X_1 - X) \vec{i} + (Y_1 - Y) \vec{j} + (Z_1 - Z) \vec{k} \quad (24)$$

e,

$$\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} = \frac{(a, b, c)}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \quad (25)$$

A distância entre o ponto  $P_1$  e o plano  $\pi$  é:

$$d(P_1, \pi) = \left| ((X_1 - X), (Y_1 - Y), (Z_1 - Z)) \cdot \frac{(a, b, c)}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \right| \quad (26)$$

logo,

$$d(P_1, \pi) = \frac{| a (X_1 - X) + b (Y_1 - Y) + c (Z_1 - Z) |}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \quad (27)$$

desenvolvendo,

$$d(P_1, \pi) = \frac{| aX_1 + bY_1 + cZ_1 - aX - bY - cZ |}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \quad (28)$$

em virtude de P pertencer ao plano  $\pi$ ,

$$-aX - bY - cZ = d \quad (29)$$

e, por tanto:

$$d(P_1, \pi) = \frac{|aX_1 + bY_1 + cZ_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (30)$$

## 2.4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

A imagem pode ser definida como uma “função bidimensional  $f(x, y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais planas e o valor de  $f$  em qualquer ponto  $(x, y)$  é chamado intensidade da imagem” (GONZALEZ E WOODS, 2002). Sob esta definição, uma discretização de dados LIDAR pelo modelo de grade regular pode ser representada como uma imagem digital onde cada elemento da grade (retângulo) define cada elemento da imagem digital (pixel - *picture element*). Em concordância, a resolução espacial da imagem corresponde com a resolução espacial da grade.

### 2.4.1. Segmentação de imagens

A segmentação de uma imagem a subdivide em suas regiões constituintes (grupos de pixels) ou objetos. Assim, a segmentação termina quando os objetos de interesse são isolados, sendo que os detalhes desnecessários são extraídos e as informações das regiões da imagem são mais ou menos homogêneas (GONZALEZ E WOODS, 2002). Normalmente, a segmentação é necessária para fazer um reconhecimento de padrões e análise automática de cenas pictóricas simplificando ou transformando uma imagem em outra bem mais representativa.

Dentre os métodos de segmentação de imagens, a limiarização (*thresholding*) é um método simples devido à facilidade de aplicação. Consiste na conversão de uma imagem para dois tons a partir de um pré-estabelecido ponto de corte chamado limiar.

Em uma imagem  $f(x, y)$  composta de objetos e fundo com níveis de intensidade agrupados em duas modas dominantes, uma maneira para extrair os objetos do fundo consiste em selecionar um limiar que separe estas modas como se ilustra na Figura 13. A imagem limiarizada se constitui agora em uma imagem binária, com dois níveis, geralmente branco e preto e é obtida por (GONZALEZ e WOODS, 2002):

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) > T \quad \text{ponto do objeto} \\ 0 & \text{se } f(x, y) \leq T \quad \text{ponto do fundo} \end{cases} \quad (31)$$

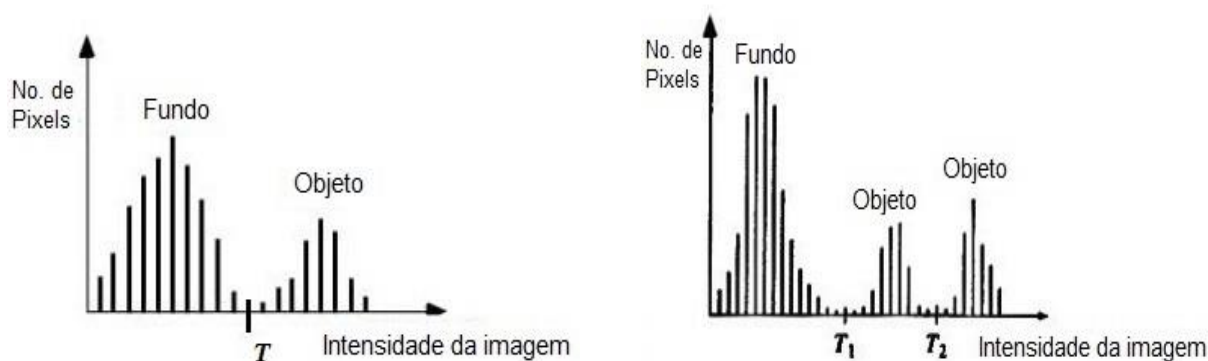
sendo,

$g$  a imagem binária

$T$  o limiar que determina os objetos do fundo.

FIGURA 13 - TIPOS DE LIMIARES NA SEGMENTAÇÃO POR LIMIARIZAÇÃO

a) Duas modas dominantes (Limiares bi-níveis)      b) Três modas dominantes (Limiares multi-níveis)



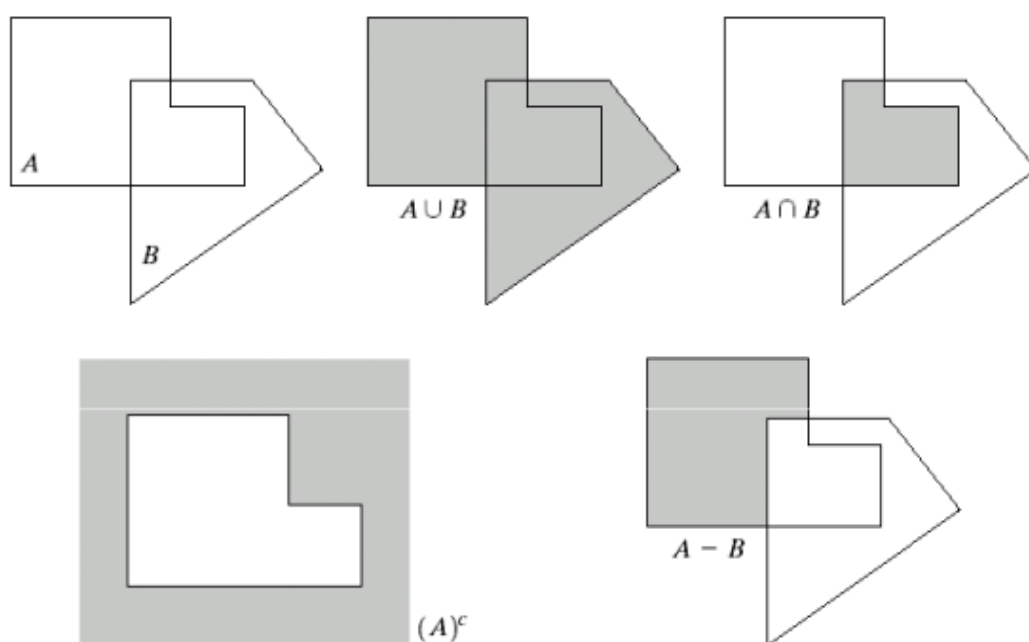
FONTE: ADAPTADO (GONZALEZ E WOODS, 2002)

#### 2.4.2. Morfologia matemática

Segundo Gonzalez e Woods (2002) o termo morfologia matemática se define como “ferramenta para a extração de componentes da imagem úteis na representação e descrição da forma da região”. Em outros termos, a morfologia matemática estuda as propriedades geométricas da imagem.

Tendo em conta que a morfologia matemática se deriva da teoria de conjuntos, na Figura 14 se apresentam as operações básicas de união, interseção, complemento e diferença entre conjuntos, usadas na definição das operações morfológicas. Assim, dados dois conjuntos A e B, a união de A e B se expressa como  $A \cup B$ ; a interseção de A e B como  $A \cap B$ ; o complemento de A como  $(A)^c$  e a diferença entre A e B como  $A - B$ .

FIGURA 14 - OPERAÇÕES BÁSICAS SOBRE CONJUNTOS

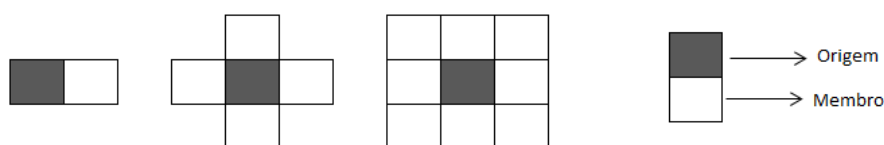


FONTE: ADAPTADO (GONZALEZ E WOODS, 2002)

A análise morfológica de uma imagem, tratada como um conjunto, é realizada por uma forma geométrica predeterminada, denominada “elemento estruturante”, que consiste em outra imagem (conjunto) cuja representação no plano tem certa forma e tamanho e é quantificada pelo modo em que este elemento está contido dentro da imagem (GONZALEZ e WOODS, 2002). A ideia básica das transformações morfológicas é a extração de estruturas geométricas dos conjuntos em que se atua mediante a utilização de outro conjunto eleito a priori em função das formas que se desejam obter. Além disso, as transformações morfológicas podem ser usadas para a construção de filtros morfológicos aplicados em detecção de bordas, segmentação e realce de imagens (GONZALEZ e WOODS, 2002).

Na prática, em imagens binárias, os conjuntos A e B podem ser definidos como: o primeiro conjunto A é a imagem que se está processando e o segundo conjunto B é a imagem menor que atua sobre A, o já definido elemento estruturante que percorrerá toda a imagem A (original) com o propósito de efetuar uma operação entre A e B em cada ponto possível (SILVA, 2014). Na Figura 15 se apresentam os tipos de elementos estruturantes mais usados no processamento morfológico.

FIGURA 15 - ELEMENTOS ESTRUTURANTES MAIS USADOS NA MORFOLOGIA MATEMÁTICA



FONTE: O AUTOR (2016)

As operações morfológicas básicas em imagens binárias para dois conjuntos de pontos A (imagem original) e B (o elemento estruturante) são:

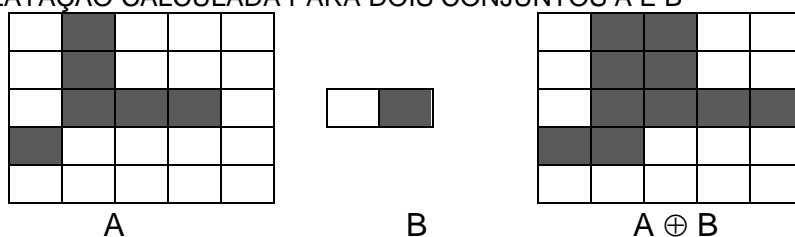
a) Dilatação:

Dada uma imagem A e um elemento estruturante B, a dilatação de A por B, define-se como:

$$A \oplus B = A \cup B \quad (32)$$

O resultado da dilatação de A por B é o conjunto de elementos tal que pelo menos um elemento do conjunto B está contido no conjunto A quando B se desloca sobre o conjunto A (SILVA, 2014) (FIGURA 16).

FIGURA 16 - DILATAÇÃO CALCULADA PARA DOIS CONJUNTOS A E B



FONTE: O AUTOR (2016)

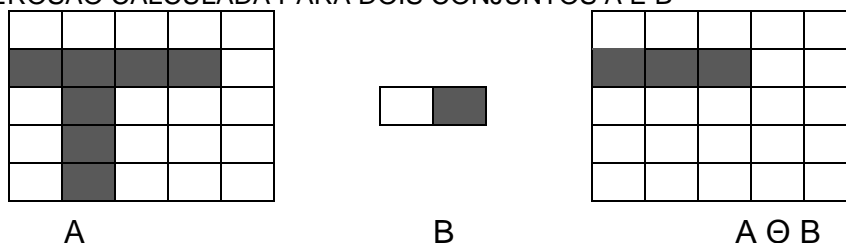
## a) Erosão:

Considera-se que a erosão não é o inverso da dilatação. A erosão de A por B, denota-se como:

$$A \ominus B = A \cap B \quad (33)$$

A erosão é o resultado de comprovar se o elemento estruturante B está completamente contido dentro do conjunto A (SILVA, 2014) (FIGURA 17).

FIGURA 17 - EROSÃO CALCULADA PARA DOIS CONJUNTOS A E B



FONTE: O AUTOR (2016)

Em síntese, a dilatação pode-se representar como a união dos traslados que faz com que os objetos se expandam, enquanto que a erosão é a interseção dos traslados negativos que produz uma redução da imagem original. Na Figura 18 se apresenta um exemplo de aplicação de morfologia matemática, onde se ilustra: a) Imagem original de quadrados de tamanho 1, 3, 5, 7, 9 e 15 pixels; b) erosão da imagem original com um elemento estruturante de 1 a 13 pixels e c) dilatação da imagem em (b) com o mesmo elemento estruturante (GONZALEZ e WOODS, 2002).

FIGURA 18 - APLICAÇÃO DAS TRANSFORMAÇÕES MORFOLÓGICAS

a) Imagem original; b) Erosão da imagem original c) Dilatação da imagem b.



FONTE: ADAPTADO (GONZALEZ E WOODS, 2002)



Na prática, a dilatação e a erosão se utilizam conjuntamente; uma dilatação seguida imediatamente de uma erosão e/ou uma erosão seguida imediatamente de uma dilatação, utilizando o mesmo elemento estruturante. Estas operações se conhecem como operadores morfológicos de “abertura” e de “fechamento”.

A abertura (*opening*) consiste em uma erosão seguida de uma dilatação; enquanto que, o fechamento (*closing*) consiste em uma dilatação seguida de uma erosão. Nos dois casos, o resultado de sua aplicação iterativa permite a eliminação dos detalhes específicos da imagem que sejam menores que o tamanho do elemento estruturante, sem uma distorção geométrica global das características não suprimidas. Nestes operadores, a origem do elemento estruturante não afeta o resultado de uma abertura ou de um fechamento, mas, sim sua forma e dimensão. (GONZALEZ e WOODS, 2002).

Uma descrição das operações morfológicas básicas e dos operadores morfológicos aplicados aos objetos, para imagens binárias com as principais características e aplicações de uso, se apresenta na Tabela 4.

TABELA 4 - OPERAÇÕES BÁSICAS E OPERADORES MORFOLÓGICOS

Operações Morfológicas		Operadores morfológicos	
		Abertura (erosão - dilatação)	Fechamento (dilatação - erosão)
Dilatação	Erosão	Separa e elimina objetos (pixels isolados) não desejáveis.	Une objetos claros e preenche cavidades.
Aumentar objetos claros	Diminuir objetos claros	Remove ruídos da imagem (pontos brancos no fundo preto).	
Conectar objetos claros	Desconectar objetos claros	Suaviza o contorno da imagem.	Suaviza o contorno da imagem.
Adicionar	Eliminar	Quebra istmos estreitos	Une quebras estreitas em golfos finos.
Diminuir e preencher cavidades	Aumentar e abrir cavidades	Elimina salientes - protuberâncias finas.	Elimina pequenos buracos

FONTE: GONZALEZ E WOODS (2002)

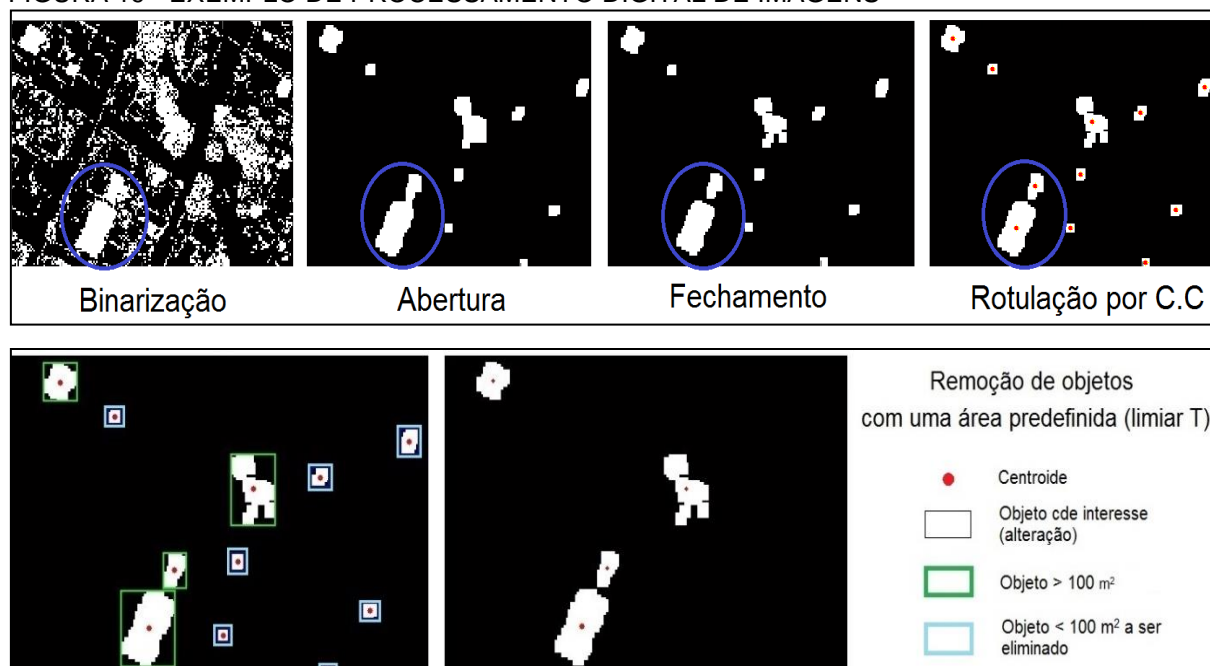
### 2.4.3. Rotulação de imagens por componentes conexas

Para poder realizar uma análise automática de imagens que resulte em uma classificação é necessário descrever o conteúdo da imagem, isto é, os objetos contidos nela; este processo é chamado rotulação. O primeiro passo dado na segmentação define os limites dos objetos, logo se devem usar algoritmos para rotular e descrever este conteúdo.

As imagens são formadas por componentes conexas que, por sua vez, são formados de pixels conectados. De acordo com Machado (2006) a conectividade entre pixels é um conceito usado no estabelecimento de bordas de objetos e componentes de regiões em uma imagem. Consiste em que todos os pixels de uma mesma região, que possuem as mesmas características por algum critério de similaridade, terão o mesmo valor nos seus níveis de cinza. A conectividade entre pixels para imagens binárias, que contêm apenas dois níveis do pixel (1 e 0) é dado pelo critério de vizinhança de 4 ou de 8 pixels. Os pixels conectados de 4 têm uma relação de adjacência horizontal e vertical (vizinhos da direita, esquerda, de cima e de baixo) enquanto que os pixels conectados de 8 têm uma relação de adjacência horizontal, vertical e também diagonal (todos os vizinhos imediatos de um pixel), incrementando o número de objetos conectados (GONZALEZ e WOODS, 2002).

Componentes conexas de uma imagem correspondem com o agrupamento dos pixels conexas que obedecem a um critério de vizinhança. A rotulação de componentes conexas é um procedimento de atribuição de um único rótulo a cada objeto ou componente conexa da imagem. No método, se tomam as partes da imagem e se associam os rótulos pixel-a-pixel. Dessa maneira, se transforma uma imagem binária em uma imagem que representa os objetos conectados (GONZALEZ E WOODS, 2002). Em essência, rotulação por componentes conexas se utiliza para a identificação e quantificação dos objetos extraídos de uma imagem. Um exemplo de aplicação pode ser a remoção de objetos em uma área predefinida (uma área cujos valores de pixel sejam maiores ou menores que um limiar  $T$ ). A Figura 19 apresenta um exemplo de aplicação de processamento digital a uma imagem com evidência das modificações que em cada processo são efetuadas a um objeto. Inicia com a binarização da imagem, seguido da aplicação dos operadores morfológicos abertura e fechamento para obter finalmente a rotulação por componentes conexas dos objetos detectados da imagem.

FIGURA 19 - EXEMPLO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS



FONTE: O AUTOR (2016)

## 2.5. DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES

Estudos iniciais na detecção de alterações de feições para zonas urbanas apresentaram técnicas de detecção por comparação com imagens (aerofotografias e ortofotos) como os tipos de dados mais utilizados. Posteriormente, com o uso da tecnologia de Sistemas LIDAR as técnicas passaram à combinação dos dados LIDAR junto com as imagens e dados em formatos raster.

As primeiras pesquisas iniciaram com Murakami (1999) que utilizou dados obtidos com tecnologia LIDAR para detectar mudanças de edificações para áreas urbanas através da geração de Modelos Digitais de Superfície - MDS. Murakami empregou diferentes MDS gerados com dados adquiridos em duas épocas por um único sistema LIDAR. As alterações foram detectadas automaticamente subtraindo os MDS de uma época do outro MDS da outra época. Posteriormente, a comparação com ortoimagens geradas com as aerofotografias obtidas simultaneamente nos levantamentos foi feita colocando a imagem de mudanças sobre as ortoimagens e identificando as mudanças nas edificações, assim reduzindo o tempo total requerido para revisar uma base de dados SIG.

Vögtle e Steinle (2004) apresentaram um método de detecção de mudanças de uma edificação utilizando dados de sensores LIDAR exclusivamente com um enfoque baseado no objeto. Geraram MDS de épocas diferentes e os compararam após um processo de segmentação baseado no algoritmo de crescimento de regiões para gerar objetos 3D independentes. Para o reconhecimento das mudanças, Vögtle e Steinle usaram as características do objeto para classificar edificações, vegetação e terreno. Por último, tomando só os objetos classificados em edificações, a comparação foi feita entre “sem alterações”, “adicionado” e “reduzido”, adição e redução em altura da edificação. Assim, desenvolveram um método para atualizar a cartografia cadastral mediante a detecção de edificações a partir de dados LIDAR comparados com o plano da edificação existente na base cadastral.

Rottensteiner (2007) apresentou um método para a detecção e classificação de mudanças de edificações a partir de MDS gerados com dados LIDAR de duas épocas e sua comparação com imagens multi-espectrais. Os resultados na detecção foram comparados com um mapa existente e bases SIG. A contribuição de Rottensteiner consistiu em evidenciar que um fator, como os pequenos erros causados por um desalinhamento entre os dados originais capturados nas épocas de obtenção dos dados LIDAR influenciam diretamente nos resultados, obtendo topologias diferentes comparados com os dados originais. Rottensteiner concluiu que para uma otimização dos conjuntos de dados distintos e para uma classificação adequada, tais fatores devem ser considerados preliminarmente e tratados para não obter falsas alterações entre os dois conjuntos de dados.

Rutzinger, M (2010) propôs um método de detecção de alterações na projeção horizontal no plano (*footprint*) das edificações por meio de análises de imagens orientadas a objetos para dados de sistemas LIDAR de épocas diferentes, obtidas por um curto período de tempo (usou dados com um intervalo de três meses aproximadamente). O critério tempo recebeu maior atenção nesta pesquisa e, conseqüentemente, problemas como a alta variabilidade da vegetação e a dificuldade para distinguir objetos temporais a partir de pequenas mudanças em edificações (em construção ou demolição). O trabalho compreendeu duas etapas principais: a construção do objeto que consistiu na detecção do *footprint* aplicado para cada SLISA pela subtração dos retornos, isto é, subtraindo o último retorno (menor elevação) do primeiro retorno (maior elevação); e a segunda etapa foi a detecção da mudança a partir da diferença de altura dos segmentos encontrados.

Rutzinger classificou por árvore de decisão “edificação sem mudança”, “nova edificação”, “edificação demolida”, “edificação parcial” e “demolição parcial”. Concluiu que a detecção de prédios demolidos é influenciada pela vegetação alta, devido à diminuição das árvores na comparação entre outono e verão.

Até aquele momento, as alterações eram detectadas em formatos raster, situação que mudou quando Hebel et al. (2011) realizou um estudo em áreas urbanas pela comparação direta de dados LIDAR multi-temporais. Hebel utilizou uma grade de ocupação organizada em células 3D para o seguimento das alterações em dados adquiridos em um intervalo de um ano. A fim de analisar todos os feixes do laser que atravessam a grade, definiu células de grade "vazia", "ocupada" e "desconhecida" e utilizou vistas oblíquas que conduzem a diferentes oclusões e densidades. Hebel considerou que a comparação por grade de ocupação de dados multi-temporais pode evitar a perda de informação pela oclusão, por exemplo, quando os pontos são comparados em um levantamento posterior.

Xu et al. (2013) estudaram como detectar automaticamente e classificar mudanças em edificações pela fusão de dados multi-temporais dos SLA e pela generalização de um Mapa de Separação de Superfícies 3D - MSS 3D (*3D Surface Separation Map*). O mapa foi gerado pela técnica de distâncias de ponto-a-plano entre os pontos de uma época para os planos mais próximos em outra época. Ambos os conjuntos de dados, classificados com antecedência como edificações, vegetação e terreno, foram utilizados para a generalização do mapa, onde as regras para as alterações pertencentes às edificações classificaram-nas como “teto”, “parede”, “sótão”, “construção sobre o teto” e “objetos indefinidos”. Dessa maneira, classificaram como mudanças em edificações as diferenças em altura maiores que 1 m e diferenças em áreas maiores que 4 m<sup>2</sup>.

Num estudo mais recente Xu et al. (2015) complementaram o método apresentado em 2013 com dados de duas épocas de sistemas LIDAR, empregando uma comparação pós-classificação 3D em nuvens de pontos multi-temporais. Igualmente ao trabalho anterior, para interpretar as mudanças geraram um mapa diferencial MSS 3D e aplicaram regras de contexto para o mapa, as quais serviram para distinguir entre "alterado", "sem alteração" e "desconhecido". Como os pontos dos elementos de “tetos” foram extraídos, foi possível combinar o resultado da classificação com a diferença de superfície, o qual permitiu também detectar áreas obstruídas onde não se pode saber se houve uma mudança ou não.

Korzeniowska e Pfeifer (2014) apresentaram uma metodologia de detecção de mudanças de edificações com uma abordagem 3D, enfatizando as vantagens obtidas nos resultados advindas da preservação da informação contida nos dados e que a princípio são perdidas em transformações para dados raster. Para a extração e classificação foi aplicado um método automático baseado nos atributos geométricos dos dados e nas estatísticas dos vizinhos dos objetos extraídos. De acordo com uma árvore de decisão foram usadas características de planaridade e quantidade de retornos. Para preservar a informação que representa o ponto da nuvem a classificação foi feita em 3D, obtendo como resultado uma nuvem de pontos classificada para “terra”, “edificações” e “outros dados”.

### **3. ÁREAS E MATERIAIS**

#### **3.1. ÁREAS DE ESTUDO**

##### **3.1.1. Área de Estudo 1. Cidade de Ponta Grossa**

Para a cidade de Ponta Grossa empregou-se os dados obtidos com o sensor ALTM 2050 em levantamento feito na data de 30/05/2011 e com o sensor Pegasus HD500 em seu voo de calibração realizado na data de 03/08/2012, para um intervalo de tempo de aproximadamente um ano. Um primeiro recorte da área levantada corresponde com a pista do aeroporto localizada ao sul da região central da cidade, com uma altitude média de 793,7 m; um segundo recorte da área de estudo é uma área localizada na região urbana na zona central da cidade de Ponta Grossa com uma altitude média de 942,5 m.

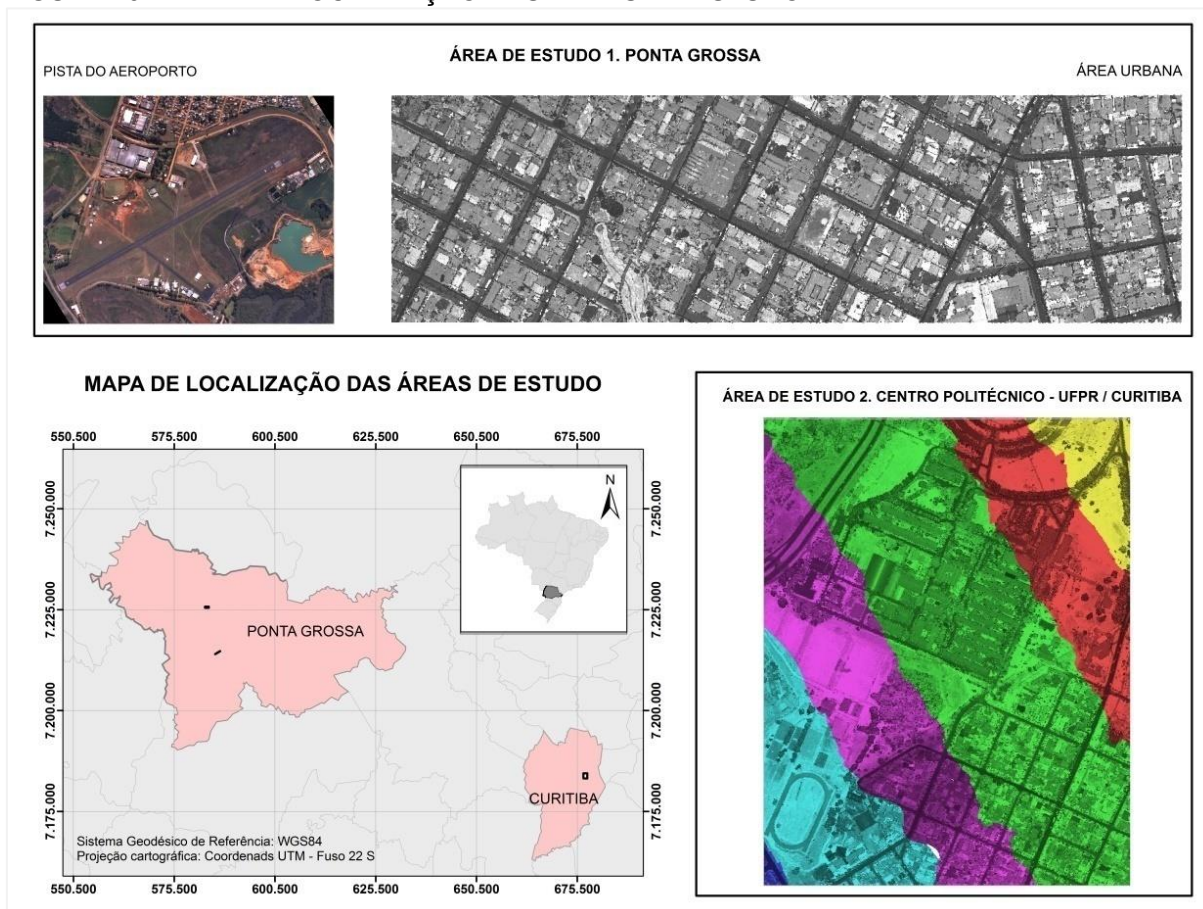
##### **3.1.2. Área de Estudo 2. Centro Politécnico da UFPR - Curitiba**

Para a cidade de Curitiba empregou-se os dados obtidos com o sensor Pegasus em levantamento feito na data de 07/08/2012 o qual cobre completamente o Centro Politécnico da UFPR.

Entretanto, do levantamento para o Centro Politécnico com o sensor ALTM 2050 realizado na data 09/05/2003 se possuem dados cuja varredura cobre uma área aproximada de 7,2 km<sup>2</sup>, dividida em seis faixas. Então, a segunda área de estudo corresponde com o entorno do campus universitário Centro Politécnico da UFPR com um intervalo de tempo de aproximadamente de nove anos e possui uma altitude média de 928,9 m.

Na Figura 20 se localizam as áreas de estudo do levantamento: da primeira área em Ponta Grossa, são apresentadas as imagens referentes a dois recortes, sendo um a pista do aeroporto (aerofoto) e outro uma área urbana (imagem de intensidade do Pegasus HD500). Da segunda área em Curitiba, mais especificamente do Centro Politécnico da UFPR, é apresentado o recorte de estudo a partir das faixas de voo do levantamento do ALTM 2050.

FIGURA 20 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO



FONTE: O AUTOR (2016)

## 3.2. RECURSOS UTILIZADOS

### 3.2.1. Dados LIDAR e aerofotografias

Os dados LIDAR obtidos com os sensores ALTM 2050 e Pegasus HD500 e as aerofotografias para as áreas de estudo foram disponibilizados pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Institutos LACTEC.

Na cidade de Ponta Grossa os levantamentos foram realizados simultaneamente com a aquisição de dados provenientes dos SLSA e de uma câmara digital de baixo custo. Sendo que, o levantamento com o ALTM 2050 ocorreu com a aquisição simultânea de 56 aerofotografias e para o levantamento com o Pegasus HD500 com a tomada de 220. Para o Centro Politécnico foram tomadas aerofotografias simultaneamente com o levantamento do Pegasus HD500 com uma câmara digital de baixo custo. Os Institutos LACTEC disponibilizaram uma imagem de intensidade do ano 2003 a partir dos dados do levantamento do ALTM 2050 e uma ortofoto do ano 2011 da área central da zona de estudo.

### 3.2.2. Softwares para o processamento de dados LIDAR

Na fase preliminar para extrair os dados LIDAR brutos e obter as nuvens de pontos, foram utilizados os softwares desenvolvidos pela Optech Inc. para depois serem processados com softwares capazes de manipular dados LIDAR, tanto comerciais como livres, e indicados no item 3.2.2.2.

#### 3.2.2.1. Software LIDAR Mapping Suite (LMS)

Para a extração dos dados brutos do ALTM 2050 anteriormente era usado o software REAL (*Results of Airborne Laser Mapping*) próprio do equipamento, no qual foram extraídos os dados do levantamento no Centro Politécnico no ano 2003. Porém, a extração atualmente é efetuada no software *LIDAR Mapping Suite* (LMS) do Pegasus HD500, utilizado para a extração dos dados dos levantamentos de Ponta Grossa e do levantamento da cidade de Curitiba no ano 2012.



### 3.2.2.2. Software para o processamentos dos dados LIDAR

#### a) *TerraSolid* com o pacote de módulos (*TerraScan* e *TerraModel*)

Utilizado para a consolidação das nuvens de pontos únicas, filtragem das nuvens de pontos, recorte de regiões, geração de modelos de superfície baseadas em superfícies TIN, correção dos erros sistemáticos e de transformação entre referenciais geodésicos no registro das nuvens de pontos e manipulação e exportação dos dados em diferentes formatos de saída tipo ASCII.

#### b) *CloudCompare*

É um software livre de processamento de nuvens de pontos, utilizado no projeto para detectar alterações entre as nuvens de pontos LIDAR das áreas de estudo, utilizando o método de determinação de distâncias de ponto a ponto. Os resultados serão tomados como parâmetros de comparação das diferenças altimétricas obtidas pelos métodos de estudo.

#### c) MATLAB

MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratório de matrizes") é um software de programação utilizado neste trabalho para: detecção de alterações entre as nuvens de pontos LIDAR das áreas de estudo através de implementação de um código de distâncias de ponto a plano; geração dos MDS a partir dos arquivos dos dados LIDAR que contém as coordenadas (X, Y, Z) em formato ASCII e aplicação de técnicas de processamento digital de imagens, que se resumem neste trabalho em binarização de imagens, aplicação de operadores morfológicos e rotulação de objetos por componentes conexas.

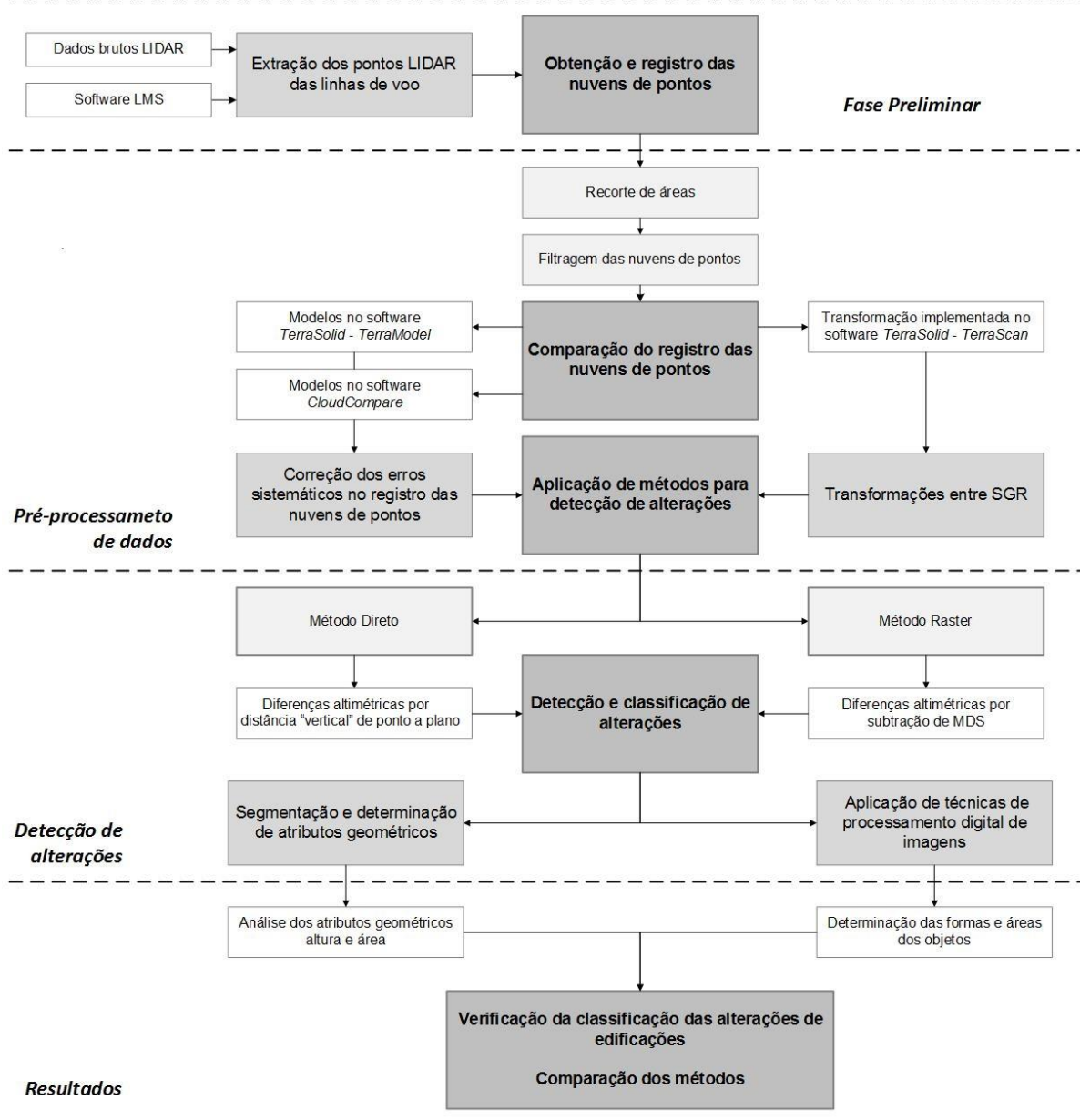
#### d) ENVI

É um software para geoprocessamento de imagens, análise e processamento de dados espectrais principalmente. O ENVI dispõe de funcionalidades importantes nesta pesquisa como a visualização e análise dos MDS gerados previamente no software MATLAB e para a detecção de alterações via subtração destes MDS.

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia aqui empregada consiste na correção preliminar dos erros porventura existentes no alinhamento das nuvens de pontos e na aplicação de dois métodos para a detecção e classificação de alterações de edificações. Às alterações detectadas serão aplicadas técnicas de processamento digital de imagens e análise de atributos geométricos para obter sua quantificação, finalizando com a comparação dos métodos. Para melhor entendimento dos processos contemplados na pesquisa, na Figura 21 é apresentado o esquema geral das etapas do trabalho.

FIGURA 21 - DIAGRAMA DAS ETAPAS GERAIS DO TRABALHO



FONTE: O AUTOR (2016)

#### 4.1. FASE PRELIMINAR

##### 4.1.1. Obtenção dos dados brutos LIDAR e parâmetros dos voos

Como os dados LIDAR são multi-temporais, identificaram-se os parâmetros dos voos focando as análises em: PRF, ângulos e frequências de varredura, velocidade da aeronave e alturas de voo. Para o detalhe destes parâmetros, na Tabela 5 se apresentam as configurações dos levantamentos em Ponta Grossa.

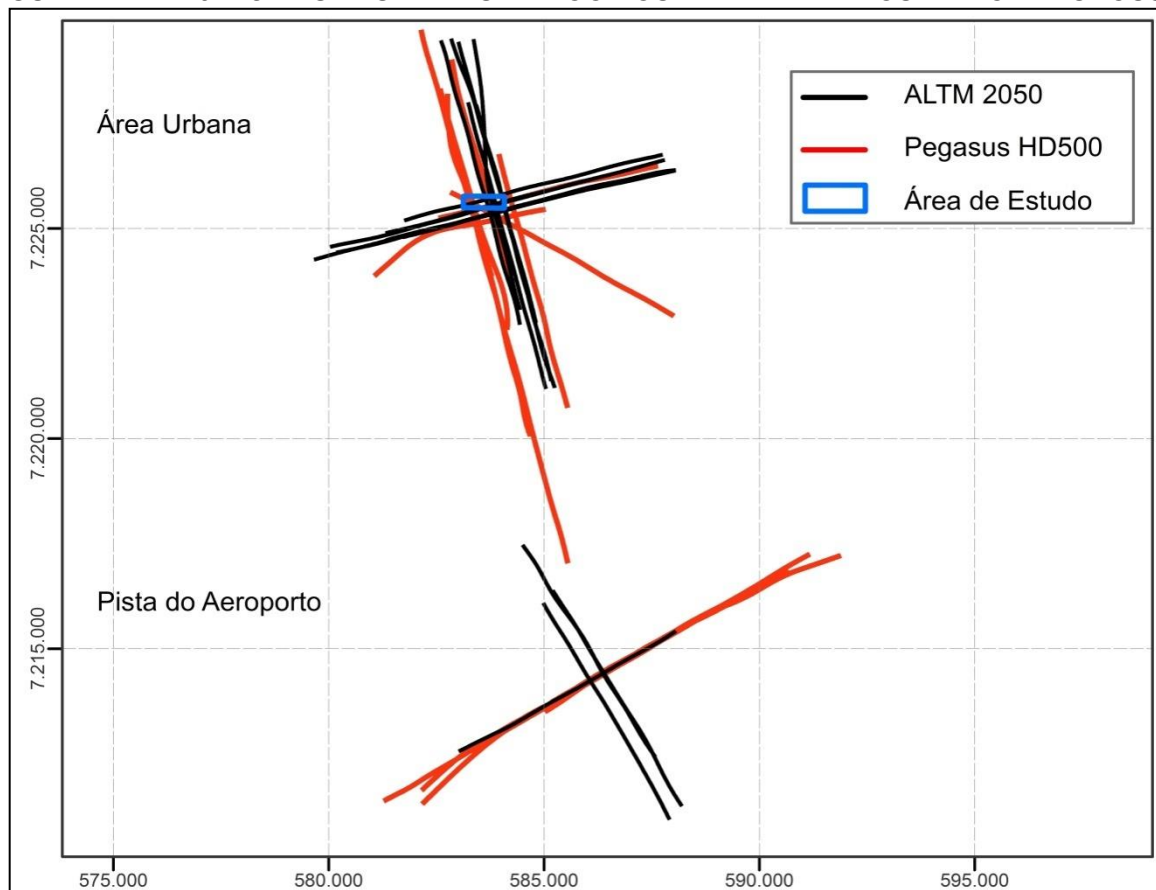
TABELA 5 - CONFIGURAÇÕES DOS VOOS DOS SLSA UTILIZADOS PARA PONTA GROSSA

SLSA	Linha de voo	PRF [kHz]	FOV [graus]	fsc [Hz]	v média da aeronave [m/s]	Altitude média da aeronave [m]	H nominal [m]	Direção da linha	Área do voo
ALTM 2050	1	50	40	25	70	2.932,70	2.000	E - W	Área Urbana
	2	50	40	25	77,6	2.934,00	2.000	W - E	
	3	50	40	25	71,7	2.935,00	2.000	N - S	
	4	50	40	25	69,6	2.933,30	2.000	S - N	
	5	50	40	25	69,4	1.995,20	1.000	E - W	
	6	50	10	25	65,4	1.995,50	1.000	W - E	
	7	50	10	25	69,1	1.994,90	1.000	E - W	
	8	50	10	25	66,4	1.994,50	1.000	N - S	
	9	50	10	25	69,6	1.994,40	1.000	S - N	
	10	50	40	25	70,2	1.995,30	1.000	N - S	
	15	50	40	29	67,6	1.799,70	1.000	W - E	Pista Aeroporto
	16	50	40	29	65,5	1.800,50	1.000	S - N	
	17	50	40	29	71,4	1.801,70	1.000	N - S	
	18	50	40	29	65,7	1.801,50	1.000	S - N	
PEGASUS HD500	1	100	64	16	81,3	4.341,40	3.400	S - N	Área Urbana
	2	100	64	23	74,1	3.297,60	2.500	W - E	Pista Aeroporto
	3	150	64	23	67,3	3.086,20	2.300	E - W	
	4	200	50	27	69,1	2.950,50	2.000	S - N	Área Urbana
	5	200	50	27	74	2.949,70	2.000	N - S	
	6	200	64	23	74,6	2.775,80	2.000	W - E	Pista Aeroporto
	7	250	64	23	65,6	2.483,20	1.700	E - W	
	8	300	64	23	78,2	2.481,30	1.700	W - E	
	9	200	50	32	60,4	1.949,60	1.000	Transversal	Área Urbana
	10	200	50	32	69,4	1.951,30	1.000	W - E	
	11	200	50	32	64,1	1.951,10	1.000	E - W	
	12	200	50	32	78,9	1.944,10	1.000	N - S	
	13	200	50	32	57,9	1.949,00	1.000	S - N	
	14	200	50	32	78,1	1.943,20	1.000	N - S	
	15	200	50	32	65,8	1.944,20	1.000	S - N	
	16	350	64	23	67,9	1.888,30	1.100	W - E	Pista Aeroporto
	17	400	64	23	68	1.783,50	1.000	E - W	
	18	450	64	23	65,6	1.685,20	900	W - E	
	19	500	64	23	62,6	1.587,00	800	E - W	

FONTE: O AUTOR (2016)

Para determinar as alturas de voo da aeronave foi considerada a altitude média da cidade de 793,7 m na região urbana e de 942,5 m na região da pista do aeroporto. A Figura 22 ilustra as linhas de voo, apresentadas na Tabela 5, com suas trajetórias, destacando a área de estudo.

FIGURA 22 - TRAJETÓRIAS DAS LINHAS DE VOO DOS LEVANTAMENTOS EM PONTA GROSSA



FONTE: O AUTOR (2016)

Para a cidade de Curitiba as configurações dos voos se apresentam na Tabela 6 para o ALTM 2050 e o Pegasus HD500 respectivamente. As alturas de voo da aeronave foram consideradas com a altitude média da cidade de 793,7 m. Na Figura 23 são mostradas as faixas do voo do ALTM 2050 e a trajetória do voo do Pegasus HD500 referidas na Tabela 6.

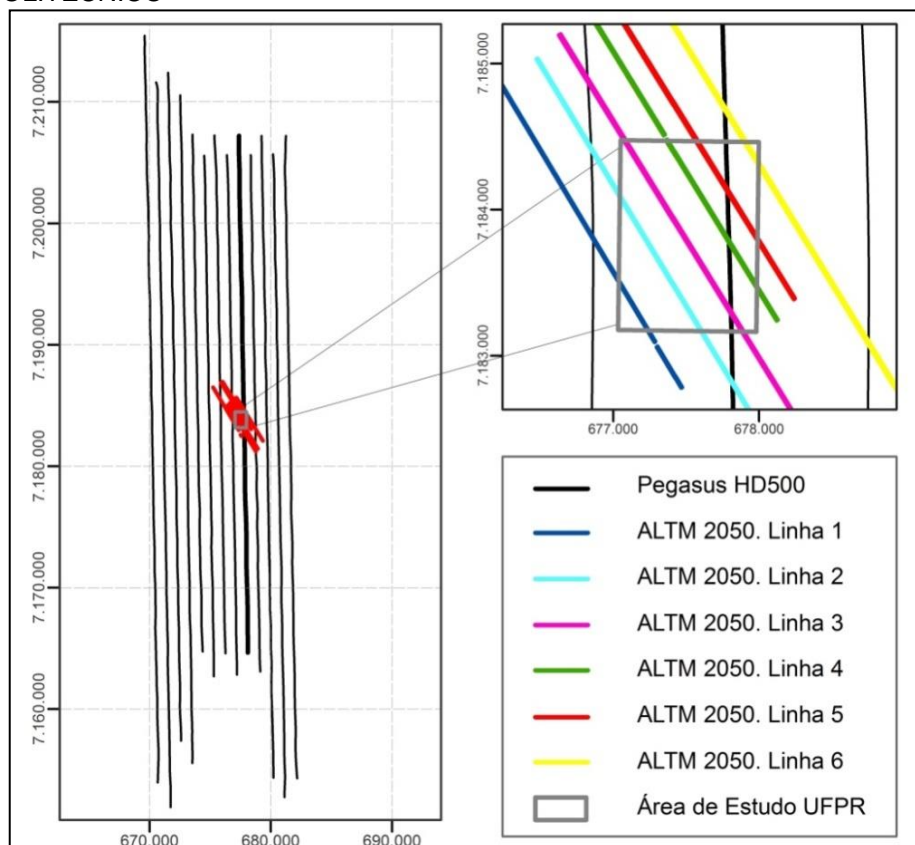
As análises dos parâmetros mencionados são indispensáveis para diferentes processos do trabalho como a seleção de linhas de voo e a determinação da densidade média de pontos nas duas áreas de estudo selecionadas.

TABELA 6 - CONFIGURAÇÕES DOS VOOS DOS SLSA UTILIZADOS PARA CURITIBA E O CENTRO POLITÉCNICO

SLSA	Linha de voo	PRF [kHz]	FOV [graus]	fsc [Hz]	v média da aeronave [m/s]	Altitude média da aeronave [m]	H nominal [m]
ALTM 2050 - Centro Politécnico	1	50	20	46,8	33,33	1.904	1.000
	2	50	20	46,8	33,33	1.894	1.000
	3	50	20	46,8	33,33	1.896	1.000
	4	50	20	46,8	33,33	1.881	1.000
	5	50	20	46,8	33,33	1.860	1.000
	6	50	20	46,8	33,33	1.867	1.000
Pegasus HD500 - Curitiba	3	150	50	32	71,23	2.512,50	1.500
	4	150	50	32	70,70	2.508,70	1.500
	5	150	50	32	72,63	2.508,00	1.500
	6	150	50	32	71,22	2.504,70	1.500
	7	150	50	32	72,75	2.505,50	1.500
	8	150	50	32	69,59	2.503,20	1.500
	9	150	50	32	73,29	2.502,20	1.500
	10	150	50	32	71,94	2.498,80	1.500
	11	150	50	32	74,76	2.498,70	1.500
	12	150	50	32	71,94	2.495,50	1.500
	13	150	50	32	74,88	2.496,50	1.500
	14	150	50	32	73,85	2.493,30	1.500
	15	150	50	32	75,26	2.494,80	1.500

FONTE: O AUTOR (2016)

FIGURA 23 - TRAJETÓRIAS DAS LINHAS DE VOO DOS LEVANTAMENTOS EM CURITIBA E CENTRO POLITÉCNICO



FONTE: O AUTOR (2016)

#### 4.1.2. Extração dos pontos LIDAR das linhas de voo

A extração dos pontos das áreas de estudo, a partir da base de dados brutos, se realizou no software LMS com o Sistema Geodésico de Referência - SGR WGS-84 projeção cartográfica UTM - Fuso 22 Sul. Para o levantamento do ALTM 2050 no Centro Politécnico da UFPR os dados foram extraídos pelo software REAL (*Results of Airborne Laser Mapping*) em formato ASCII, no SGR-SAD-69/96, projeção cartográfica UTM - Fuso 22 Sul.

#### 4.1.3. Obtenção e registro das nuvens de pontos

Dada a grande quantidade de linhas de voo disponíveis para Ponta Grossa, se selecionaram as linhas de voo que, cobrindo a área de estudo, tivessem com ambos os sensores LIDAR menor altura de voo e similaridade na direção de voo. Assim, a menor altura nominal de voo registrada foi de 1.000 m com uma direção de voo de Este a Oeste (E - W). As linhas de voo selecionadas para Ponta Grossa encontram-se na Tabela 7 junto com um resumo dos parâmetros dos voos.

TABELA 7 - LINHAS DE VOO SELECIONADAS PARA A ÁREA DE ESTUDO 1.

Parâmetros	Pista do Aeroporto		Área Urbana	
	ALTM 2050	Pegasus HD500	ALTM 2050	Pegasus HD500
No. de Linha de voo selecionada	15	17	5	11
PRF [kHz]	50	400	50	200
FOV [graus]	40	64	40	50
fsc [Hz]	29	23	25	32
v média da aeronave [m/s]	67,6	68,0	69,4	64,1
H média de voo [m]	1.006,0	989,8	1.052,7	1.008,6
Direção da linha de voo	W - E	E - W	E - W	E - W

FONTE: O AUTOR (2016)

Para o Centro Politécnico, o critério para a seleção das linhas de voo foi o recobrimento total da área de estudo, o que implicou usar todas as linhas de voo do levantamento do ALTM 2050 e uma linha do voo do Pegasus HD500. Um resumo de comparação das configurações de voo para esta área está apresentado na Tabela 8.

TABELA 8 - LINHAS DE VOO SELECIONADAS PARA ÁREA DE ESTUDO 2.

Parâmetros	ALTM 2050	Pegasus HD500
No. de Linha de voo selecionada	Todas (6 Linhas)	11
PRF [kHz]	50	300
FOV [graus]	20	50
fsc [Hz]	46,8	32
v média da aeronave [m/s]	33,33	74,76
H média de voo [m]	954,8	1.569,8

FONTE: O AUTOR (2016)

Para a obtenção de uma nuvem de pontos única para cada linha de voo selecionada do Pegasus HD500 se devem unir os arquivos de saída individuais obtidos originalmente no software LMS de cada um dos canais C1 e C2 do sistema multicanal ou também chamado sistema Discreto. Este processo é feito no software *TerraSolid* no módulo *TerraScan* dado que o LMS não dispõe desta opção, obtendo-se ao final o registro em uma nuvem de pontos única. Ao final, os parâmetros de comparação das faixas usadas apresentados na Tabela 9 são calculados e considerados para identificar a densidade média de pontos; critério utilizado para definir a resolução espacial fixa dos MDS.

TABELA 9 - PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DOS VOOS

Parâmetros	Área de Estudo 1. Ponta Grossa				Área de Estudo 2. Centro Politécnico		
	Pista do Aeroporto		Área Urbana				
	ALTM 2050	Pegasus HD500	ALTM 2050	Pegasus HD500	ALTM 2050	Pegasus HD500	
No. de faixa	15	17	5	11	6 faixas	11	
Largura da faixa [m]	732	1.237	766	941	337	1.464	
Área da faixa [m²]	4.108.192	7.852.352	4.757.137	4.952.370	1.430.974	105.775.410	
Espaçamento entre pontos [m]	$dX_{along}$	2,331	2,957	2,776	2,003	0,725	2,336
	$dX_{across}$	0,849	0,142	0,776	0,301	0,620	0,312
No. de pontos por faixa	4.194.831	41.198.131	4.604.794	19.706.761	2.963.557	216.442.495	
Densidade média de pontos por faixa [Pts/m²]	1,021	5,247	0,968	3,979	2,071	2,046	

FONTE: O AUTOR (2016)

## 4.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 4.2.1. Recorte e filtragem das áreas de estudo

As áreas dos recortes realizados nas áreas de estudo encontram-se indicados na Tabela 10 tanto para Ponta Grossa como para o Centro Politécnico.

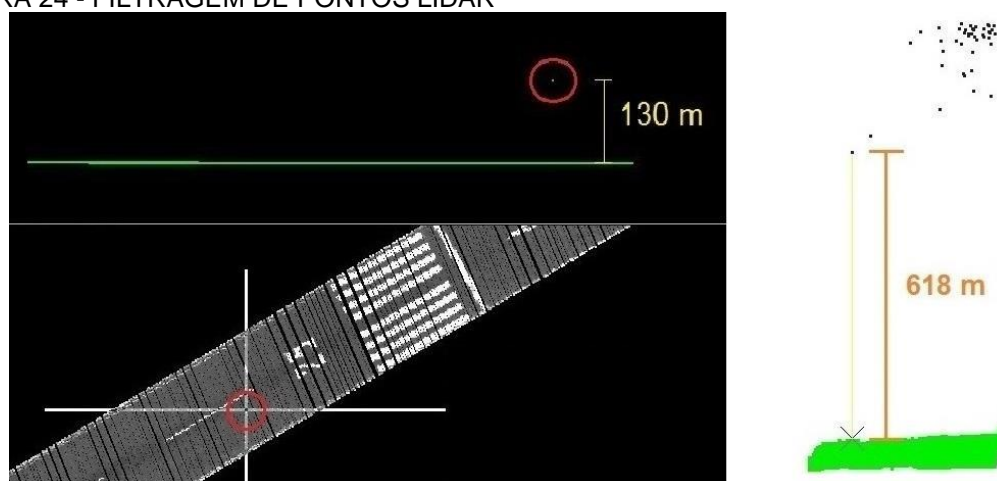
TABELA 10 - ÁREAS DOS RECORTES NAS ZONAS DE ESTUDO

No.	Área de estudo	Zona do recorte	Área [m <sup>2</sup> ]
1	Área de Estudo 1. Ponta Grossa	Pista do Aeroporto	48.856,7
2		Área urbana	260.925,0
3	Área de Estudo 2. Centro Politécnico	Campus Universitário	807.611,0

FONTE: O AUTOR (2016)

Como os sensores LIDAR têm a capacidade de detectar elementos não constitutivos do terreno denominados “ruídos” que podem gerar influências nos MDS e nos cálculos de distâncias entre pontos, deve-se realizar uma filtragem das nuvens de pontos. Considerou-se o termo filtragem segundo Briese e Pfeifer (2001) como “filtro de erros grosseiros (pontos acima do terreno e, com menos frequência, pontos abaixo)” excluindo os pontos identificados como “ruídos”. Na Figura 24 se evidencia tais pontos com a apresentação das nuvens de pontos na pista do aeroporto (esquerda) e na área urbana de Ponta Grossa (direita).

FIGURA 24 - FILTRAGEM DE PONTOS LIDAR



FONTE: O AUTOR (2016)



No software *TerraSolid* é realizado o procedimento de filtragem com duas opções disponíveis no software: os pontos podem ser eliminados da nuvem por seleção manual ou pela ferramenta de elevação absoluta. Com esta ferramenta do módulo *TerraScan* é possível eliminar todos os pontos que estejam acima ou mesmo abaixo de uma altura especificada. Na Tabela 11 apresentam-se os resultados após o processo de filtragem de pontos para cada uma das áreas de estudo.

TABELA 11 - RESULTADOS DA FILTRAGEM DE PONTOS

No	Área do Recorte		ALTM 2050			Pegasus HD500		
			Pts. Originais	Pts. Filtrados	Total	Pts. Originais	Pts. Filtrados	Total
1	Ponta Grossa	Pista Aeroporto	42.988	0	42.988	208.445	1	208.444
		Área urbana	241.783	0	241.783	919.875	43	919.832
2	Centro Politécnico		2.508.119	231	2.507.888	2.406.955	65	2.406.890

FONTE: O AUTOR (2016)

#### 4.2.2. Comparação de referenciais das nuvens de pontos

Tendo em conta que se trabalha com dados multi-temporais, a comparação dos referenciais das nuvens de pontos pretende detectar os erros no alinhamento dos diferentes conjuntos de dados, de tal maneira que não sejam registradas falsas alterações. Por exemplo, na distribuição dos pontos das nuvens na primeira área de estudo ocorre um posicionamento superior dos pontos da nuvem do ALTM 2050 em relação aos pontos da nuvem do Pegasus HD500, pelo qual se determina um erro sistemático de altura. Para determinar o valor do erro sistemático são gerados modelos de superfície para cada conjunto de dados utilizando o software *TerraSolid*. Por outra parte, com o software *CloudCompare* são obtidas as distâncias entre as nuvens de pontos. Conjuntamente são realizadas comparações entre os softwares em zonas consideradas sem interferências, chamadas neste trabalho zonas de prova. As comparações determinam o valor a ser ajustado e se resumem em:

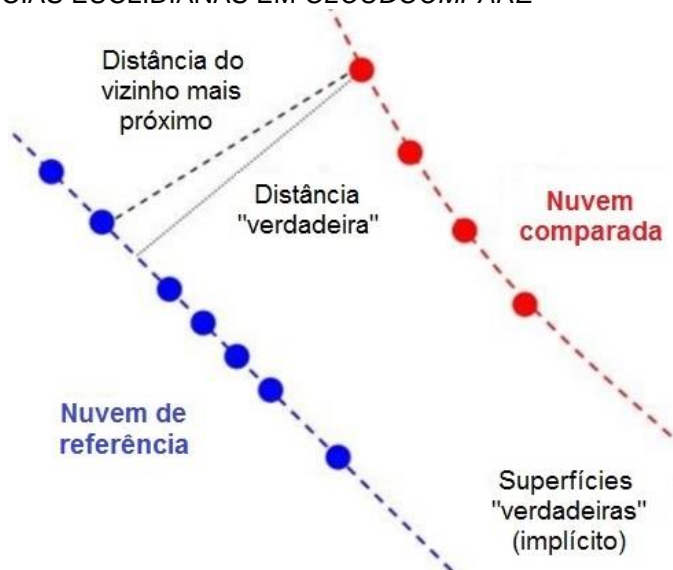
a) Comparação 1: Pista do Aeroporto.

b) Comparações 2 e 3: Rua 1 (R1) e Rua 2 (R2) na área urbana da cidade.

No módulo *TerraModel* do software *TerraSolid* são gerados os modelos de superfície para as zonas de prova. Um tipo de modelo que o *TerraModel* utiliza está baseado em superfícies TIN. Três pontos (um triângulo) são o número mínimo de pontos necessários para definir um plano. Uma maneira de definir uma superfície é por uma serie de planos (triângulos). O processo de determinar as melhores triangulações se chama vinculação (*linking*) e as linhas imaginárias entre os pontos para definir os triângulos se chamam linhas de enlace (*link lines*). O *TerraModel* utiliza as bordas destes triângulos (linhas de enlace) para interpolar as localizações dos contornos. Os enlaces entre os pontos não são verdadeiros objetos do *TerraModel*, mas uma propriedade dos pontos no modelo empregado para interpolar elevações. (TERRASOLID LIMITED, 2002).

No software *CloudCompare* são obtidas as distâncias entre as nuvens de pontos para as zonas de prova servindo-se do método utilizado, que implica comparações diretas entre as nuvens. O cálculo de distâncias de nuvem a nuvem no *CloudCompare* utiliza como método padrão a “distância do vizinho mais próximo”, onde, para cada ponto da nuvem comparada, o *CloudCompare* procura o ponto mais próximo na nuvem de referência e calcula sua distância euclidiana (FIGURA 25). Isto acontece quando se fixa o modelo como “Nenhum (*None*)”, opção oferecida nas ferramentas do software para o cálculo de distâncias entre nuvens de pontos. (CLOUDCOMPARE, 2015).

FIGURA 25 - DISTÂNCIAS EUCLIDIANAS EM CLOUDCOMPARE



FONTE: CLOUDCOMPARE (2015)

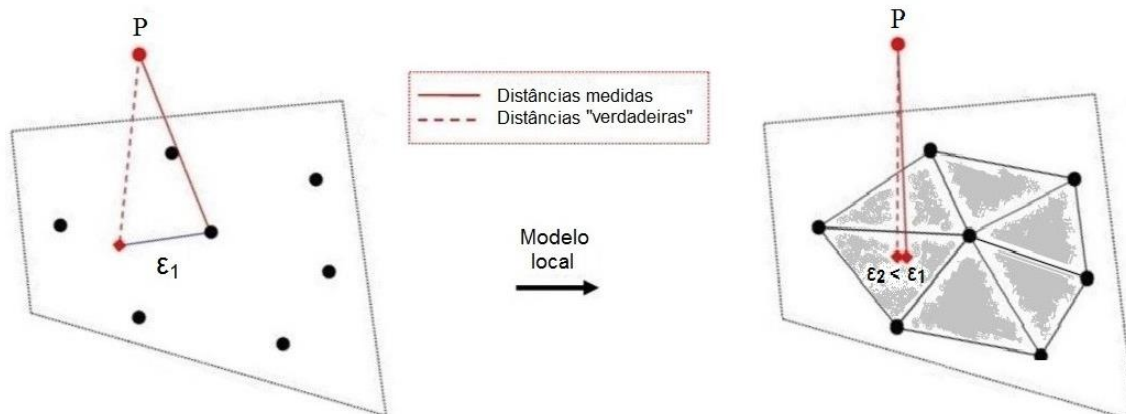
O software *CloudCompare* fornece uma maneira para obter uma melhor aproximação à “distância verdadeira”; equivalente à distância obtida a partir da nuvem comparada com a superfície subjacente representada pela nuvem de referência. Para isto, é necessário modelar a nuvem de referência (superfície subjacente) ajustando um modelo matemático sobre o ponto “mais próximo” e vários de seus vizinhos. Uma vez determinado o ponto mais próximo na nuvem de referência, a distância de cada ponto da nuvem, comparada em relação ao seu ponto mais próximo da nuvem de referência, é substituída pela distância do modelo matemático; este cálculo é realizado de ponto a plano, sendo um procedimento de determinação de distâncias estatisticamente mais preciso. Os modelos matemáticos de ajuste disponíveis no software *CloudCompare* são Mínimos Quadrados, Triangulação de Delaunay e Função Quadrática.

Na Figura 26 exemplificam-se os procedimentos descritos para a determinação de distâncias com modelo local; primeiro pela distância de um ponto da nuvem comparada ao ponto mais próximo da nuvem de referência (distância ponto a ponto) e segundo pela distância de um ponto da nuvem comparada à superfície modelada na nuvem de referência (distância ponto a plano). Na imagem (a) a distância do ponto P ao ponto “mais próximo”, denominada distância euclidiana, apresenta um erro  $\varepsilon_1$ . Na imagem (b) a distância do ponto P à superfície modelada inclui o modelo para o ponto “mais próximo” e seus seis vizinhos com um erro  $\varepsilon_2$ . A comparação dos erros das duas distâncias é denotada como  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ , dado que o erro para as distâncias entre pontos e superfícies ( $\varepsilon_2$ ) é menor que o erro para as distâncias euclidianas ( $\varepsilon_1$ ).

FIGURA 26 - DISTÂNCIAS EM CLOUDCOMPARE COM MODELO LOCAL

a) Distâncias Euclidianas

b) Distâncias entre pontos e superfícies



FONTE: CLOUDCOMPARE (2015)

Para os procedimentos realizados no software *CloudCompare* foram levados em conta os seguintes parâmetros:

a) A nuvem de referência é a nuvem de pontos do ALTM 2050 e a nuvem comparada é a nuvem do Pegasus HD500.

b) Nivel *Octree*

O cálculo da distância se realiza com o nível da subdivisão dos *octrees*. O *CloudCompare* recomenda deixar o padrão pré-definido, pois mudando este parâmetro só muda o tempo de cálculo.

c) Máxima Distância

Utiliza-se um valor para limitar a procura da distância máxima que entre as duas nuvens pode existir; o valor estabelecido foi de 1 m.

d) Modelos matemáticos de ajuste

Quando se usa o modelo “nenhum” (*none*), a distância à nuvem é a distância do vizinho mais próximo.

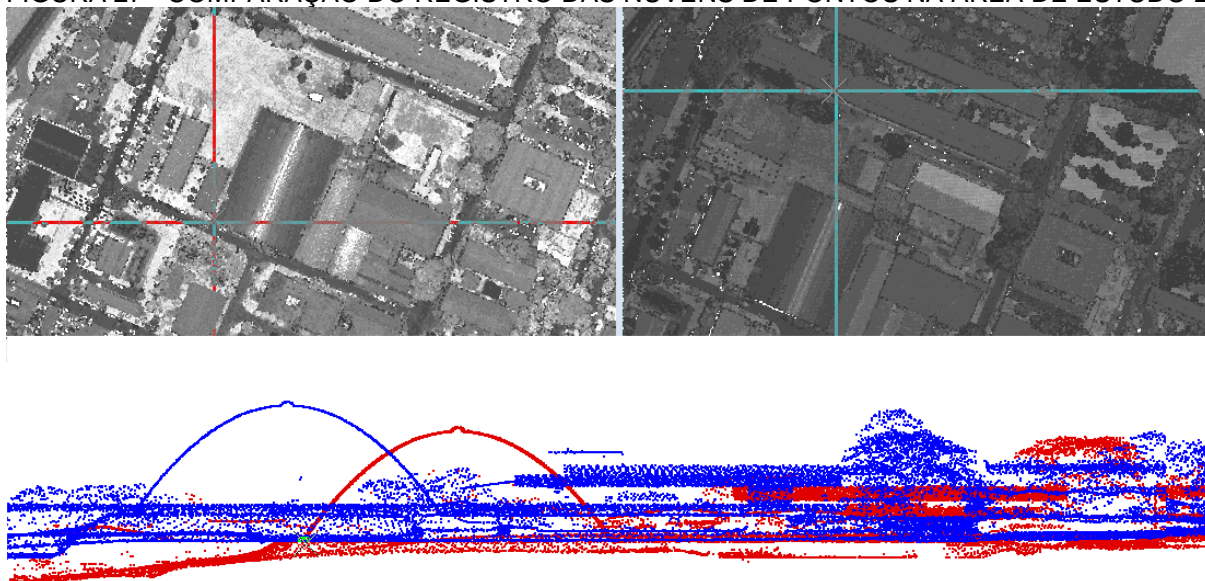
A seguir, apresenta-se a condição das nuvens de pontos no Centro Politécnico (FIGURA 27). Para a análise da compatibilidade no registro das nuvens de pontos, na Figura 27, as seguintes informações são consideradas:

a) Na primeira janela se localiza um ponto obtido pelo sistema ALTM 2050 que possui coordenadas UTM (677.443,65 7.183.927,55 911,11) referidas ao SGR SAD-69/96.

b) Na segunda janela se localiza o mesmo ponto obtido pelo sistema Pegasus HD500 com coordenadas UTM (677.391,97 7.183.885,31 915,51) referidas ao SGR WGS-84.

c) Na terceira janela se apresenta um perfil transversal dos pontos nos dois sistemas LIDAR onde se evidencia que as nuvens não são compatíveis.

FIGURA 27 - COMPARAÇÃO DO REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2



FONTE: O AUTOR (2016)

#### 4.2.2.1. Correção do erro sistemático para o registro das nuvens de pontos

Devido aos erros no alinhamento das nuvens de pontos entre os conjuntos de dados LIDAR, um ajuste entre as nuvens de pontos se faz necessário. Para Ponta Grossa, as diferenças de alinhamento indicam um erro sistemático no valor de elevação (coordenada Z) sendo a correção dada pelo valor de ajuste determinado nas comparações. Pode-se aplicar uma correção de elevação sistemática de uma nuvem de pontos no *TerraSolid* - módulo *TerraScan* escrevendo o valor da correção (dz) diretamente na opção “Transformar Pontos”.

#### 4.2.2.2. Transformações entre Sistemas Geodésicos de Referência - SGR

Para a cidade de Curitiba, as coordenadas do referencial do ALTM 2050 são transformadas para o referencial do Pegasus HD500. Com base na teoria de transformações entre referenciais geodésicos, no software *TerraSolid* é possível compatibilizar os SGR em que foram extraídos os dados brutos dos Sensores LIDAR.

Usando o módulo *TerraScan* se pode aplicar uma transformação de coordenadas para referenciar nuvens de pontos em diferentes etapas do fluxo de trabalho, por exemplo, ao importar ou exportar pontos para arquivos de saída. As transformações no *TerraScan* se definem como:

a) Transformações de sistemas de projeção definidos pelo usuário

Transformações de coordenadas que podem ser definidos por uma série de parâmetros ou equações (modelos matemáticos).

Com esta opção foi implementado pelos Institutos LACTEC no software *TerraSolid* uma transformação no modo “definida pelo usuário” que transforma do SGR SAD-69/96 para o SGR WGS-84, dado que não está pré-estabelecida no software. O *TerraScan* utiliza como modelo matemático a transformação geométrica 3D do Corpo Rígido de sete parâmetros; transformação também chamada Isogonal, Helmert ou Similaridade que aplica três translações ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ), três rotações ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) e um fator de escala ( $\lambda$ ). O modelo matemático funcional está dado por:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (34)$$

onde,

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} : \text{são as coordenadas do referencial de destino (Pegasus HD500);}$$

$\lambda$  : é o fator de escala;

$R(\omega, \varphi, \kappa)$ : é a matriz das rotações, onde os ângulos ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) são pequenas rotações em torno dos eixos (X, Y, Z);

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} : \text{são as coordenadas no referencial de origem (ALTM 2050);}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} : \text{s\~ao os par\~ametros de transla\~c\~ao};$$

O sistema de proje\~c\~ao implementado no software *TerraSolid - TerraScan* se divide em tr\~es partes (TERRASOLID, 2000):

a) Elips\'oide

Definido por semi-eixo maior e achatamento. \u00c9 usado o elips\'oide internacional de 1967 para o SAD-69/96 e o elips\'oide GRS-80 para o WGS-84.

b) Datum

Definido pelos sete par\~ametros da transforma\~c\~ao.

c) Proje\~c\~ao

Neste caso, \u00e9 definida a proje\~c\~ao cartogr\'afica UTM, Fuso 22 Sul.

Foram identificados nove pontos hom\'ologos distribu\'idos regularmente na \u00e1rea de estudo do Centro Politecnico, com coordenadas obtidas a partir das nuvens de pontos dos sistemas ALTM 2050 e Pegasus HD500, para serem utilizados na avalia\~c\~ao da acur\'acia planim\'etrica e altim\'etrica da transforma\~c\~ao entre os Sistemas Geod\'esicos de Referencia-SGR como pontos de verifica\~c\~ao. Os pontos foram medidos nos cantos das edifica\~c\~oes, e, dentro de um c\'irculo de raio 50 cm, todos os pontos laser encontrados foram selecionados. Consequentemente, por haver mais de um ponto dentro do raio estabelecido, determinou-se a coordenada final pela m\'edia aritm\'etica das coordenadas de todos os pontos dentro do c\'irculo. Na Figura 28, na janela (a) se ilustra a distribuic\~ao espacial dos pontos hom\'ologos e, nas janelas de detalhe (b) e (c) se apresenta um exemplo da medi\~c\~ao das coordenadas dos pontos, como descrito anteriormente.

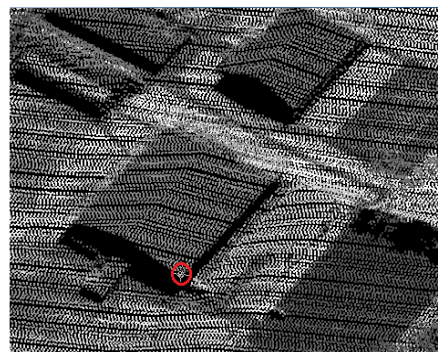


FIGURA 28 - PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO 2

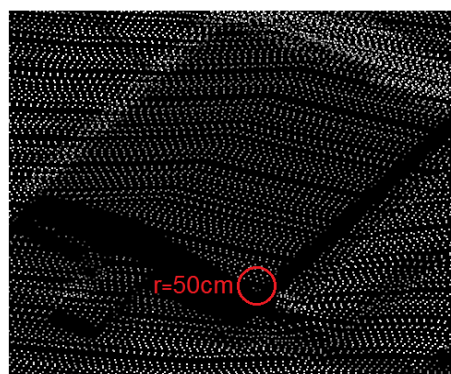
a) Distribuição dos pontos homólogos



b) Identificação dos pontos nos cantos das edificações em um círculo de raio 50 cm



c) Seleção dos pontos nos cantos das edificações dentro do círculo de raio 50 cm



FONTE: O AUTOR (2016)

As coordenadas dos pontos homólogos (pontos de verificação) medidos e obtidos seus respectivos desvios padrões são apresentadas na Tabela 12.

TABELA 12 - COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

SLSA	Ponto	Coordenadas UTM [m]			Desvios padrões [m]		
		X	Y	Z	Desvio padrão X	Desvio padrão Y	Desvio padrão Z
ALTM 2050 SGR SAD 69/96	1	677400,12	7183335,88	928,01	0,07	0,36	0,01
	2	677197,94	7183738,00	912,81	0,00	0,00	0,04
	3	677282,03	7184302,70	906,65	0,21	0,12	0,08
	4	677583,01	7184175,86	913,69	0,16	0,12	0,05
	5	677818,99	7184378,37	924,06	0,07	0,30	0,02
	6	677957,93	7183773,42	926,15	0,16	0,24	0,02
	7	677926,44	7183342,24	923,44	0,07	0,22	0,06
	8	677634,04	7183387,54	923,57	0,33	0,20	0,11
	9	677585,76	7183845,81	922,62	0,03	0,17	0,01



SLSA	Ponto	Coordenadas UTM [m]			Desvios padrões [m]		
		X	Y	Z	Desvio padrão X	Desvio padrão Y	Desvio padrão Z
PEGASUS HD500 SGR WGS84	1	677349,05	7183293,53	932,31	0,10	0,29	0,05
	2	677147,39	7183692,28	917,52	0,04	0,13	0,01
	3	677232,17	7184258,83	910,94	0,28	0,24	0,09
	4	677532,75	7184131,75	918,12	0,04	0,27	0,04
	5	677768,54	7184333,11	928,32	0,10	0,08	0,03
	6	677908,11	7183729,59	930,55	0,29	0,19	0,01
	7	677875,45	7183298,52	927,72	0,28	0,20	0,07
	8	677584,51	7183343,89	927,78	0,28	0,24	0,06
	9	677534,05	7183801,51	926,73	0,35	0,01	0,05

FONTE: O AUTOR (2016)

Continuando com o processo de estimação das diferenças entre os pontos homólogos para determinar os parâmetros a ter em conta na transformação entre os referencias dos equipamentos, as diferenças entre as coordenadas dos pontos homólogos são apresentadas na Tabela 13. Observa-se que os EQM planimétricos apresentam valores consideravelmente mais elevados, em uma proporção de 3,5 vezes que os EQM altimétricos, o qual influencia diretamente na determinação do EQM total.

TABELA 13 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

Ponto	Diferenças das coordenadas Coordenadas UTM [m]			Erros quadráticos médios Coordenadas UTM [m]		
	dif X	dif Y	dif Z	EQM altimétrico	EQM planimétrico	EQM
1	51,07	42,36	-4,30	18,48	66,35	66,49
2	50,55	45,71	-4,71	22,14	68,16	68,32
3	49,87	43,87	-4,29	18,43	66,42	66,56
4	50,26	44,11	-4,43	19,62	66,87	67,02
5	50,46	45,26	-4,26	18,15	67,78	67,91
6	49,82	43,83	-4,40	19,39	66,36	66,50
7	50,99	43,72	-4,29	18,38	67,17	67,31
8	49,52	43,64	-4,21	17,75	66,01	66,14
9	51,71	44,31	-4,10	16,85	68,09	68,22
Média	50,47	44,09	-4,33	18,80	67,02	67,16

FONTE: O AUTOR (2016)

### 4.3. MÉTODOS PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES

Os dados obtidos por sensores LIDAR resultam em uma nuvem de pontos aleatoriamente distribuídos em posição e elevação, o que causa que os pontos não atinjam o mesmo local em dois levantamentos diferentes (não se obtém uma mesma coordenada). Assim, a aplicação de um método de espaçamento regular para as comparações entre nuvens de pontos LIDAR multi-temporais constitui uma solução aproximada ao problema. Em função disto, dois métodos foram empregados neste trabalho.

O primeiro método de tipo raster, definido como indireto dado que consiste na subtração de MDS gerados para os dados LIDAR. Porém, usando os MDS mesmo sendo suficientemente densos para representar adequadamente a cena urbana, apresenta-se um segundo método; um método vetorial de determinação de distâncias verticais de ponto a plano entre as mesmas nuvens de pontos, definido como direto por conter a informação original de altura perdida nos MDS. Para adaptar as diferenças obtidas pelos métodos são estabelecidos os seguintes critérios:

- a) Diferenças absolutas de altura menores que 2 m não são consideradas alterações.
- b) São alterações as diferenças que em área sejam maiores que 20 m<sup>2</sup>, eliminando classificações inadequadas que não correspondam com edificações como caminhões ou grupos de carros, grupos de árvores, regiões de floresta, etc.

#### 4.3.1. Detecção de alterações pelo método raster

O método raster de detecção de alterações consiste em determinar as diferenças altimétricas entre os MDS gerados para os conjuntos de pontos multi-temporais das zonas de estudo. Usando a metodologia proposta por Araki (2005) para geração de MDS, foi implementado um código no software MATLAB que utiliza os dados LIDAR - coordenadas (X, Y, Z) armazenadas em arquivos ASCII.

Com estes arquivos são geradas grades regulares sem interpolação de valores de altura, diminuindo assim os efeitos causados pela interpolação como a incerteza na reconstrução de feições lineares como pontes ou linhas de transmissão, por exemplo (ARAKI, 2005). A metodologia para a geração dos MDS compreendeu as seguintes etapas:

a) Determinação da resolução da grade regular retangular

Com as coordenadas dos pontos: X mínimo, X máximo, Y mínimo e Y máximo, definiu-se o tamanho da grade. A resolução espacial fixa de cada grade foi calculada a partir da densidade média de pontos fornecidos na Tabela 8 para cada área de estudo ( $1/\sqrt{\text{densidade}}$ ). Na Tabela 14, encontram-se os critérios obtidos na geração das grades para as áreas de estudo (área urbana em Ponta Grossa e a área do Centro Politécnico).

TABELA 14 - PARÂMETROS DAS GRADES REGULARES GERADAS NAS ÁREAS DE ESTUDO

Parâmetros		Área de Estudo 1. Ponta Grossa. Área Urbana		Área de Estudo 2. Centro Politécnico	
		ALTM 2050	Pegasus HD500	ALTM 2050	Pegasus HD500
Total de pontos do recorte		241.783	919.875	2.507.888	2.406.890
Densidade média de pontos por Recorte [Pts./m <sup>2</sup> ]		0,927	3,525	3,106	2,980
Tamanho do pixel [m]		1,00		0,60	
No. de linhas e colunas	Linhas	272		797	
	Colunas	947		1.013	

FONTE: O AUTOR (2016)

b) Projeção dos pontos na grade

Todos os pontos foram lidos a partir de um arquivo ASCII e os valores de altitude (coordenada Z) foram projetados na grade regular. Baseado no estudo de Araki (2005) se considerou previamente:

- As regiões correspondentes a “vazios” podem acontecer em superfícies de corpos d’água onde não se tem retorno do sinal laser e em edificações geralmente altas aonde o sinal laser não chega devido à oclusão. Portanto, nas células da grade que não receberam nenhum valor é necessária uma forma de preenchimento;

- Utilizar o primeiro retorno para definir a elevação;
- Nas regiões com superposição entre faixas adjacentes, uma mesma célula pode receber maior quantidade de pontos do que em outras regiões;

c) Preenchimento das células da grade “vazios” a partir dos vizinhos

Para cada posição vazia na grade, efetua-se a verificação de existência ou não de valores na vizinhança de 4; caso existam, considerando-se a elevação observada do primeiro retorno, a posição da grade é preenchida com o valor correspondente à média dos vizinhos.

d) Aplicação do operador morfológico fechamento da morfologia matemática para preencher regiões de bordas entre áreas não homogêneas.

Lembrando que o operador fechamento consiste na aplicação sequencial dos operadores básicos de dilatação e erosão, considerou-se:

- Na imagem resultante da aplicação da dilatação tem-se a eliminação de padrões escuros e, como consequência, o clareamento da imagem. Estes padrões escuros correspondem aos elementos da grade que não haviam sido preenchidos, como as regiões de bordas. Com isto, pode ter aumento da extensão de telhados (ARAKI, 2005).
- Com a erosão se tem o efeito contrário: diminuição das áreas claras (elevadas) e a recuperação da forma das edificações, embora com perda de pequenos detalhes. Segundo Araki (2005) em áreas urbanas, onde existe proximidade entre casas, árvores e muros pode haver a união de tais feições utilizando operadores morfológicos. A dimensão do elemento estruturante, neste caso foi de 3x3.

e) Tratamento das regiões sem informação

Para o preenchimento das regiões sem informação é gerada uma janela a partir da imagem raster obtida na última etapa. Esta janela é determinada para cada região a ser corrigida, onde se realiza uma inspeção manual das zonas correspondentes a “vazios” ou cujos valores dos pixels é 0.

Após, procura-se o menor valor de altura da janela especificada, para logo, utilizar este valor para substituir todos os valores 0 (sem informação) dentro da janela e finalmente preencher todas as regiões sem informação deixando a imagem completa com valores de altura.

Por último, no software ENVI são detectadas as alterações pela subtração dos MDS gerados. Existem duas opções para este processo: utilizando “*Compute Difference Map*” da ferramenta “*Change Detection*” ou a ferramenta “*Band Math*”. A comparação, igualmente para as duas opções, é realizada pixel a pixel e o resultado é representado por uma imagem identificada por pixels com tons mais claros para as mudanças positivas e com tons mais escuros para as mudanças negativas. A vantagem da primeira opção frente à matemática de bandas (*Band Math*) consiste em controlar as classes (limiares) para uma classificação por alturas. Dessa maneira, as alterações entre  $\pm 2$  m como limiar pré-estabelecido, são dadas como “sem mudança” na imagem de diferenças e a partir deste valor podem ser representadas as alterações segundo a classificação definida. Nas subtrações dos MDS, o MDS do Pegasus HD500 é tomado como a nuvem comparada e o MDS do ALTM 2050 como a nuvem de referência, resultando em uma terceira grade denominada “grade de diferenças (GD)” apresentada igualmente em um formato raster. A formulação da nova grade gerada é denotada por:

$$GD = GZ_1 - GZ_2 \quad (35)$$

sendo,

$GZ_1$  a grade derivada dos dados do ALTM 2050

$GZ_2$  a grade derivada dos dados do Pegasus HD500

#### 4.3.1.1. Determinação das formas e áreas dos objetos

Para a análise dos dados obtidos do método raster é gerada uma imagem das alterações detectadas, para a qual serão aplicados métodos de processamento digital utilizando o software MATLAB iniciando com o processo de limiarização.

Serão aplicados os operadores morfológicos *Abertura (Opening)* e *Fechamento (Closing)* com o qual se pretende reduzir áreas como vias e árvores individuais e preencher áreas como construções com buracos. Para a aplicação das operações é usado como elemento estruturante um quadrado de raio 3 (denotado como *strel square, 3* no MATLAB) com origem no centro. Após o tratamento das imagens com operadores morfológicos, devem-se identificar os objetos de interesse, é dizer, as edificações propriamente ditas, arranjadas por grupos de pixels conexos. Esta identificação será feita aplicando o método de componentes conexas utilizando uma conectividade entre pixels dado pelo critério de 8-vizinhança. Como resultado do método é possível obter os centróides (coluna, linha) e áreas dos objetos encontrados nas imagens derivadas da grade de diferenças. As análises das propriedades destes objetos serão feitos nos experimentos de cada uma das áreas de estudo.

#### **4.3.2. Detecção de alterações pelo método vetorial**

A programação para determinar as alterações com o método vetorial, implementado no software MATLAB obedece aos seguintes critérios:

- a) Os planos serão formados pela nuvem do ALTM 2050, como nuvem de referência, cujos planos são triângulos formados pela triangulação de Delaunay e os pontos serão tomados da nuvem do Pegasus HD500, como nuvem comparada.
- b) Dado um ponto pertencente à nuvem de pontos do Pegasus HD500 determina-se, a partir de suas coordenadas, qual das triangulações do ALTM 2050 comporta o domínio das coordenadas planas (X e Y). Seja (a, b, c) o vetor que define a normal ao triângulo selecionado (o plano).
- c) Estabelecido um ponto (Pegasus HD500) e um triângulo (ALTM 2050) calcula-se a distância conforme a Equação Geral do Plano.

$$aX_1 + bY_1 + cZ_1 - (aX_0 + bY_0 + cZ_0) = 0 \quad (36)$$

onde,

$P_1 (X_1, Y_1, Z_1)$  o ponto projetado verticalmente no triângulo do sistema ALTM 2050

$P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$  o ponto do sistema Pegasus HD500

- d) Logo, como o ponto do sistema Pegasus HD500 é projetado no plano (triângulo) do sistema ALTM 2050, a programação calcula a coordenada  $Z_1$  do ponto  $P_1$  usando somente  $(X_1, Y_1)$  de  $P_1$ , assim:

$$aX_1 + bY_1 + cZ_1 - (cZ_0) = 0 \quad (37)$$

A distância é dada por:

$$d = Z_1 - Z_0 \quad (38)$$

para um ponto do Pegasus HD500 em um plano  $P_1$  do ALTM 2050

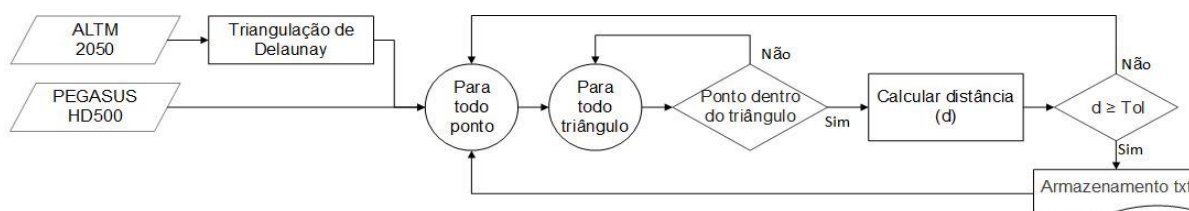
sendo,

$Z_1$  a coordenada Z dos dados do ALTM 2050

$Z_0$  a coordenada Z dos dados do Pegasus HD500

Para melhor compreensão do método, o fluxograma do processo é apresentado na Figura 29.

FIGURA 29 - FLUXOGRAMA DA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS DE PONTO A PLANO



FONTE: O AUTOR (2016)

No cálculo das distâncias, procurando otimizar o tempo no processamento dos dados, o código desenvolvido será implementado em áreas menores selecionadas a partir das alterações detectadas nas imagens do método raster. Para determinar a existência ou não de alterações, definiu-se como critério a mesma tolerância em altura (Tol) aplicada no método raster ( $\pm 2$  m).

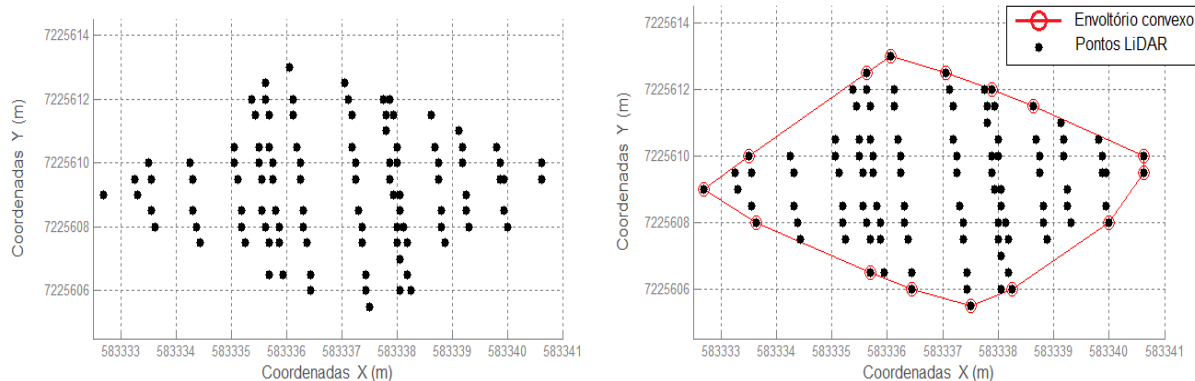
#### 4.3.2.1. Segmentação e determinação das áreas das alterações

Para a determinação das áreas das alterações detectadas pelo método vetorial, as feições serão previamente segmentadas por suas geometrias contínuas obtendo os polígonos das possíveis edificações. De acordo com a forma destes polígonos se faz necessário utilizar dois métodos para a determinação das áreas:

##### a) *Convex Hull* (envoltório convexo)

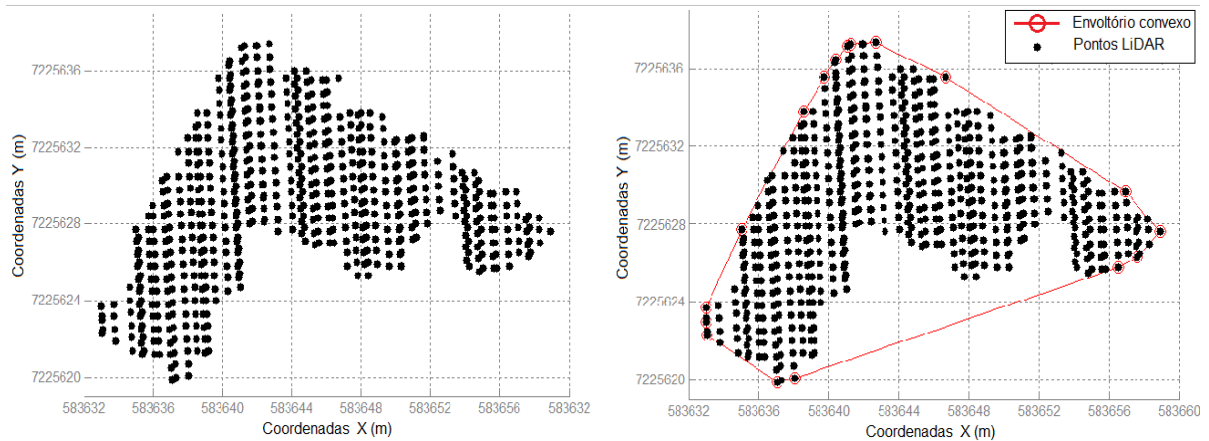
Este método consiste em gerar o menor polígono (envoltório convexo) que englobe um determinado conjunto de pontos no espaço 2D. Para gerar o envoltório convexo são utilizadas as coordenadas (X, Y) dos conjuntos de pontos LIDAR das alterações detectadas (FIGURA 30a), por meio do comando “*convhull*” do software MATLAB. Porém, para os conjuntos de pontos que se representem por polígonos com formas irregulares o método *Convex Hull* pode retornar áreas aumentadas como se apresenta na Figura 30b.

FIGURA 30 - ENVOLTÓRIOS CONVEXOS PARA UM CONJUNTO DE PONTOS LiDAR (X, Y)  
a) *ConvexHull* para polígonos com formas regulares





b) *ConvexHull* para polígonos com formas irregulares



FONTE: O AUTOR (2016)

b) Fórmula de área de Gauss.

Este método é usado para polígonos de formas irregulares como no exemplo anterior. Neste algoritmo matemático os vértices do polígono estão definidos como pares de coordenadas no plano 2D, neste caso, as coordenadas X, Y dos pontos LIDAR de tais vértices. A fórmula baseia-se na soma e subtração das áreas dos polígonos regulares formados pelos vértices e projeções sobre os eixos X e Y, cuja expressão pode ser dada pela equação (BRADEN, 1986):

$$A = \frac{1}{2} \left| \left[ \sum_{i=1}^n Y_i \cdot X_{i+1} - \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_{i+1} \right] \right| \quad (39)$$

onde,

A, é a área do polígono

n, é o número de lados do polígono, quando n+1 usa-se 1

(X<sub>i</sub> , Y<sub>i</sub>), quando i= 1, 2, ... n, são os vértices do polígono

Ao se tratar de um polígono cíclico:

$$X_{n+1} = X_1 \text{ e } X_n = X_0, \text{ o mesmo que para } Y_{n+1} = Y_1 \text{ e } Y_n = Y_0 \quad (40)$$

#### **4.3.3. Classificação das alterações detectadas**

As diferenças de nível classificam as alterações detectadas como edificações novas ou demolições, de acordo com os valores positivos ou negativos, respectivamente. No caso de existirem os dois tipos de valores, a classificação é determinada pelo tipo de valor com maior tendência para cada experimento nas áreas de estudo. A classificação das alterações detectadas de edificações é estabelecida para este trabalho de acordo com os seguintes conceitos:

a) Edificação ou construção nova

Construção aderida ao terreno com carácter de permanente ou definitivo, identificada a partir dos valores positivos em Z encontrados.

b) Demolição

Construção ou edificação existente derrubada total ou parcialmente, identificada a partir dos valores negativos em Z encontrados.

#### **4.3.4. Comparação dos métodos**

As comparações dos métodos estão definidas de duas maneiras:

a) Comparação por altura das edificações

A comparação inclui os resultados obtidos pelo software *CloudCompare* das distâncias entre as nuvens de pontos das áreas de estudo. O objetivo do cômputo é a comparação dos resultados obtidos neste software com os obtidos vetorialmente.

b) Comparação por tamanho das edificações

A comparação das áreas obtidas pelos métodos raster e vetor, com a avaliação de uma amostra de áreas obtidas e consideradas como verdade de campo.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS

O primeiro resultado a ser avaliado é a qualidade na correção dos erros de alinhamento ou de registro das nuvens de pontos dos sistemas LIDAR. De acordo com as especificações dos equipamentos, para uma altura de voo de 1.000 m (TABELA 3), tem-se uma acurácia máxima em altura de 13 cm. Tendo em vista que, em especificações e características tecnológicas, o Pegasus HD500 tem uma vantagem comparativa com respeito ao ALTM 2050, a referencia neste caso para o alinhamento das nuvens de pontos será o Pegasus HD500 e a partir dele são ajustadas a nuvens de pontos do ALTM 2050. Em consequência, as discrepâncias altimétricas depois de realizados os ajustamentos que estejam entre 0 e 13 cm não serão consideradas como erros de registro.

#### 5.1.1. Correção do erro sistemático

Na Tabela 15 se relacionam as discrepâncias entre os modelos de superfície obtidos no software *TerraSolid - TerraModel* para as comparações realizadas nas zonas de prova de Ponta Grossa.

TABELA 15 - RESULTADOS DAS COMPARAÇÕES NO SOFTWARE *TERRASOLID* DOS MODELOS DE SUPERFÍCIE PARA AS ZONAS DE PROVA

Zona de Prova		Comparação	Valores em Z [m]	
			Média	Desvio padrão
Pista do Aeroporto		Modelo do ALTM 2050	793,65	0,65
		Modelo do Pegasus HD500	793,42	0,63
		Diferenças entre Modelos	0,22	0,03
Área Urbana	Rua 1 (R1)	Modelo do ALTM 2050	950,64	1,47
		Modelo do Pegasus HD500	950,47	1,48
		Diferenças entre Modelos	0,21	0,04
	Rua 2 (R2)	Modelo do ALTM 2050	948,69	2,04
		Modelo do Pegasus HD500	948,46	2,02
		Diferenças entre Modelos	0,21	0,03

FONTE: O AUTOR (2016)

Na Tabela 16 são apresentados os resultados das distâncias entre as nuvens de pontos das zonas de prova obtidas no software *CloudCompare* com cada um dos modelos matemáticos definidos pelo software.

TABELA 16 - RESULTADOS NO SOFTWARE *CLOUDCOMPARE* DAS DISTÂNCIAS ENTRE AS NUUVENS DE PONTOS DAS ZONAS DE PROVA

Zona de Prova		Modelo Matemático	Valores em Z [m]	
			Média	Desvio padrão
Pista do Aeroporto		Vizinho mais próximo ( <i>none</i> )	0,31	0,10
		Mínimos quadrados	0,22	0,03
		Triangulação de Delaunay	0,25	0,09
		Função quadrática	0,22	0,04
		Média dos modelos (sem vizinho mais próximo)	0,23	0,06
Área Urbana	Rua 1 (R1)	Vizinho mais próximo ( <i>none</i> )	0,32	0,12
		Mínimos quadrados	0,23	0,10
		Triangulação de Delaunay	0,24	0,10
		Função quadrática	0,22	0,08
		Média dos modelos (sem vizinho mais próximo)	0,23	0,09
	Rua 2 (R2)	Vizinho mais próximo ( <i>none</i> )	0,33	0,15
		Mínimos quadrados	0,21	0,08
		Triangulação de Delaunay	0,25	0,12
		Função quadrática	0,22	0,09
		Média dos Modelos (sem vizinho mais próximo)	0,23	0,09

FONTE: O AUTOR (2016)

Como o *CloudCompare* permite ajustar com um modelo matemático as distâncias euclidianas para o ponto 'mais próximo', os resultados do modelo “vizinho mais próximo (*none*)” que representam estas distâncias, são apresentados na Tabela 14, mas, foram excluídos na determinação da média dos modelos tendo em vista sua visível deficiência. Finalmente, na Tabela 17 se apresentam as estatísticas das comparações que determinaram o valor do erro sistemático em altura a ser corrigido na coordenada Z nas nuvens de pontos do sistema ALTM 2050 da área de estudo de Ponta Grossa.

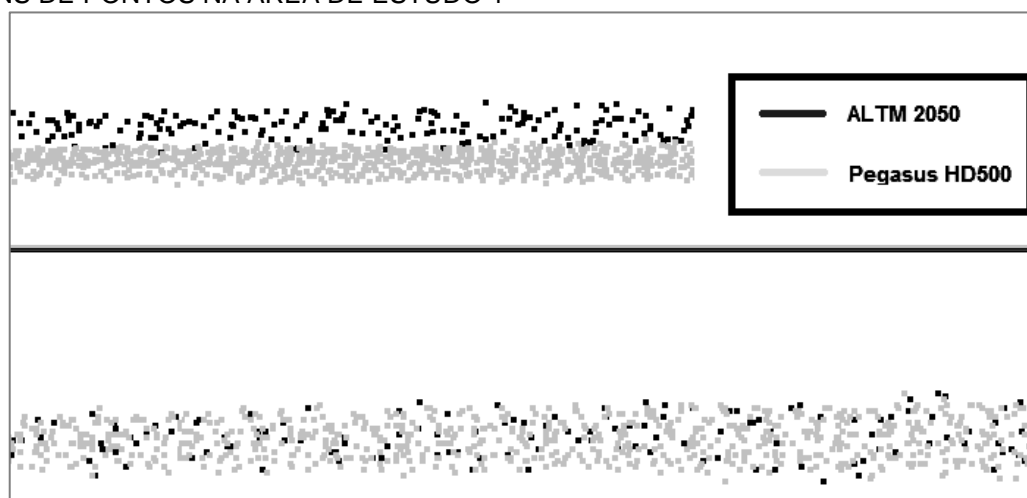
TABELA 17 - ESTATÍSTICAS DA COMPARAÇÃO DOS SOFTWARES NAS ZONAS DE PROVA

Zona de Prova		Software	Média	Desvio padrão
Pista do Aeroporto		<i>TerraSolid-TerraModel</i>	0,22	0,03
		<i>CloudCompare</i>	0,23	0,06
Área Urbana	Rua 1 (R1)	<i>TerraSolid-TerraModel</i>	0,21	0,04
		<i>CloudCompare</i>	0,23	0,09
	Rua 2 (R2)	<i>TerraSolid-TerraModel</i>	0,21	0,03
		<i>CloudCompare</i>	0,23	0,09
Total			0,22	0,06

FONTE: O AUTOR (2016)

O valor em altura aplicado às nuvens de pontos do ALTM 2050 para Ponta Grossa foi -0,22 m. O ajuste das nuvens de pontos se vê refletido na comparação visual do perfil transversal da pista do aeroporto apresentado na Figura 31, com as nuvens antes da correção (parte superior) e depois da correção (parte inferior).

FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO DA CORREÇÃO DO ERRO SISTEMÁTICO NO REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1



FONTE: O AUTOR (2016)

### 5.1.2. Transformação entre os Sistemas Geodésicos de Referência

Dado que as alterações são baseadas na coordenada Z, a aceitação da transformação geométrica está em função do EQM altimétrico, o qual se determina como aceito na transformação entre os SGR para o Centro Politécnico (Tabela 18), de acordo com a acurácia do ALTM 2050 fornecida na Tabela 1.

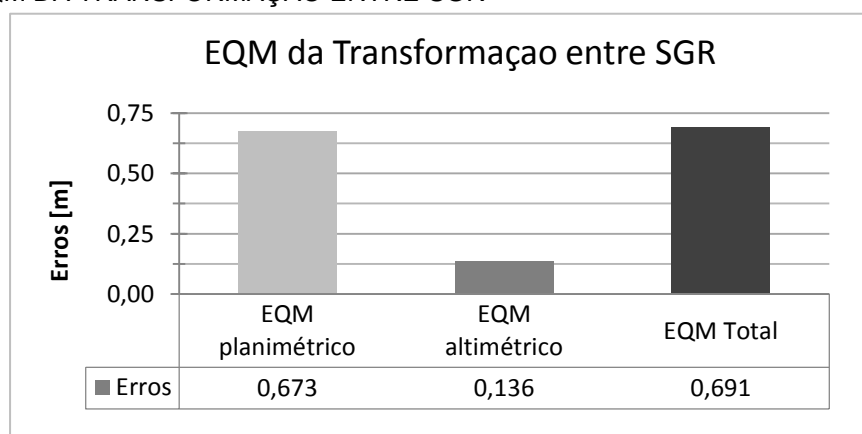
TABELA 18 - DIFERENÇAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO AJUSTADOS

Ponto	Diferenças em coordenadas UTM [m]			Erros em coordenadas UTM [m]		
	dif X	dif Y	dif Z	EQM altimétrico	EQM planimétrico	EQM
1	-0,29	-0,12	-0,32	0,0992	0,3089	0,4412
2	0,11	-0,65	-0,06	0,0036	0,6621	0,6648
3	-0,08	-0,04	0,05	0,0027	0,0875	0,1019
4	0,55	-0,04	-0,13	0,0156	0,5561	0,5700
5	-0,45	0,44	-0,04	0,0016	0,6364	0,6377
6	-0,15	-0,33	0,20	0,0400	0,3611	0,4128
7	0,27	0,24	0,03	0,0010	0,3581	0,3595
8	-0,21	-0,64	-0,01	0,0001	0,6715	0,6715
9	0,35	-0,25	-0,06	0,0036	0,4293	0,4335
Média	0,01	-0,15	-0,04	0,0186	0,4523	0,4770
EQM	0,31	0,34	0,13	0,1364	0,6726	0,6909

FONTE: O AUTOR (2016)

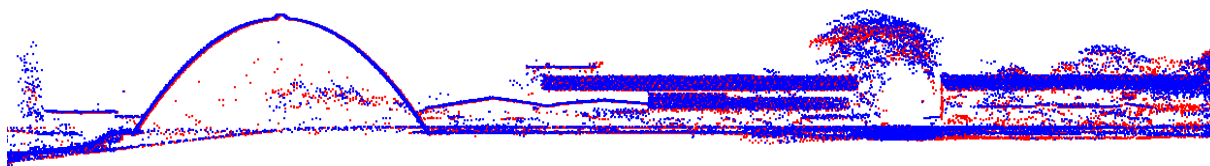
No Gráfico 1 se ilustra os EQM da transformação. Embora o EQM planimétrico tenha um valor elevado, o EQM altimétrico se encontra dentro do valor de acurácia próximo aos 13 cm, o dado de maior relevância neste trabalho.

GRÁFICO 1 - EQM DA TRANSFORMAÇÃO ENTRE SGR



Na Figura 32 se apresenta um perfil transversal da área de comparação utilizada no item 4.2.2 (FIGURA 27) confirmando visualmente a correção dos erros no registro das nuvens de pontos do Centro Politécnico.

FIGURA 32 - REPRESENTAÇÃO DA CORREÇÃO DO ERRO POR DIFERENÇA DE SGR NO REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2



FONTE: O AUTOR (2016)

## 5.2. DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES

### 5.2.1. Alterações de edificações detectadas pelo método Raster

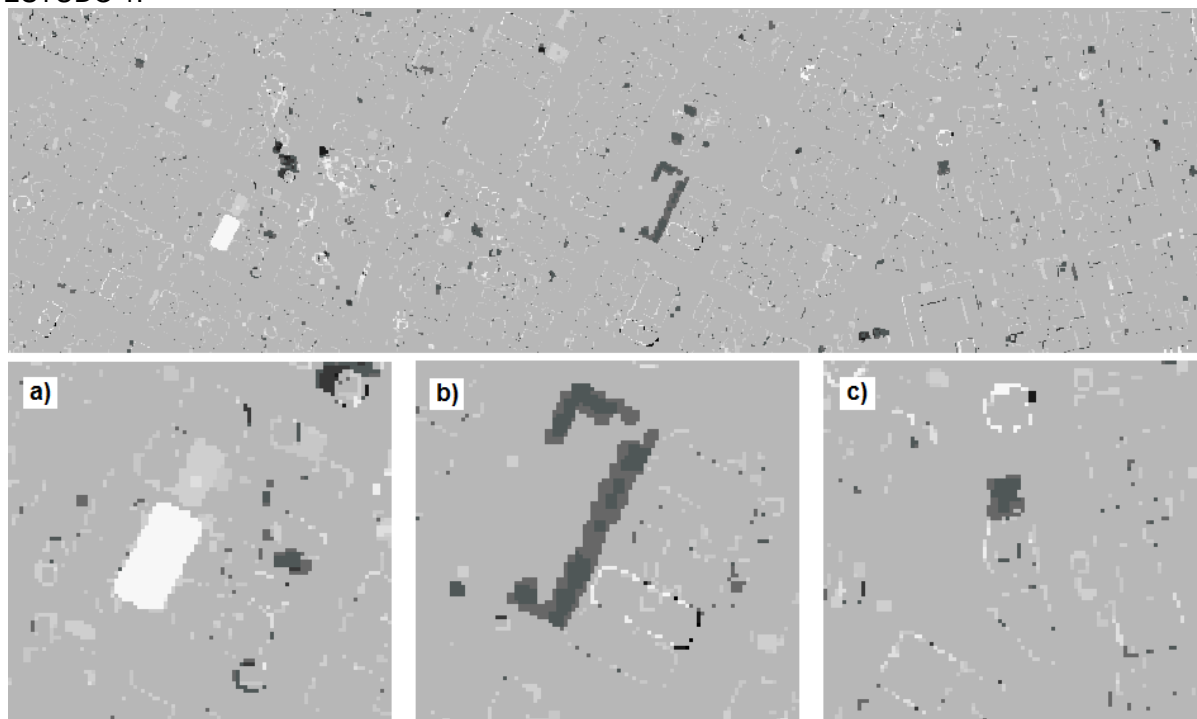
As grades de diferenças obtidas no método raster são representadas em uma imagem inicial gerada no software ENVI, a qual se constitui na imagem a ser processada digitalmente. Nos MDS mostrados são indicadas as áreas selecionadas a partir das alterações detectadas no método raster, para o desenvolvimento dos experimentos na determinação das distâncias verticais de ponto a plano e atributos.

Para a determinação de alturas pelo método, a partir do reconhecimento dos objetos de interesse em cada experimento foram identificadas as regiões mais claras e mais escuras na imagem de alterações, e identificadas suas coordenadas para estabelecer as diferenças máximas de nível registradas em cada objeto.

#### 5.2.1.1. Área de estudo 1. Cidade de Ponta Grossa

A imagem da grade de diferenças para Ponta Grossa gerada com a opção “*Compute Difference Map*” do software ENVI é apresentada na Figura 33. A partir desta imagem foram selecionadas três áreas de acordo com a identificação de algumas das alterações mais significativas em altura e/ou tamanho. Estas áreas são apresentadas nas janelas detalhadas (a), (b) e (c). Os tons cinza representam as feições que não apresentaram alterações, observando-se um cenário urbano com pouca atividade mobiliária no intervalo de tempo em que foram tomados os dados. Observam-se quadras e até mesmo regiões onde não há mudanças.

FIGURA 33 - IMAGEM DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 1.

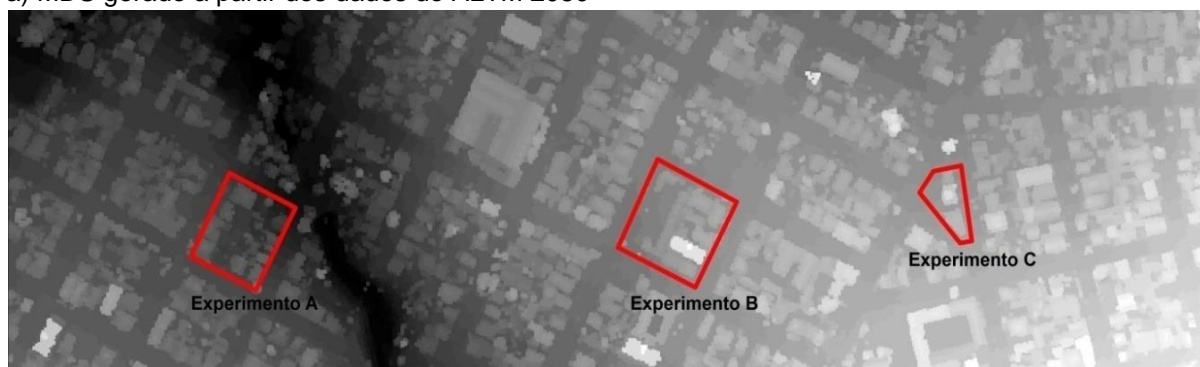


FONTE: O AUTOR (2016)

Nos MDS mostrados na Figura 34, obtidos a partir dos dados LIDAR, são delimitadas as áreas dos experimentos. Nestes MDS estas delimitações representam quadras da cena urbana com as alterações mais relevantes derivadas das observações da imagem anterior, que correspondem a experimentos denominados A, B e C.

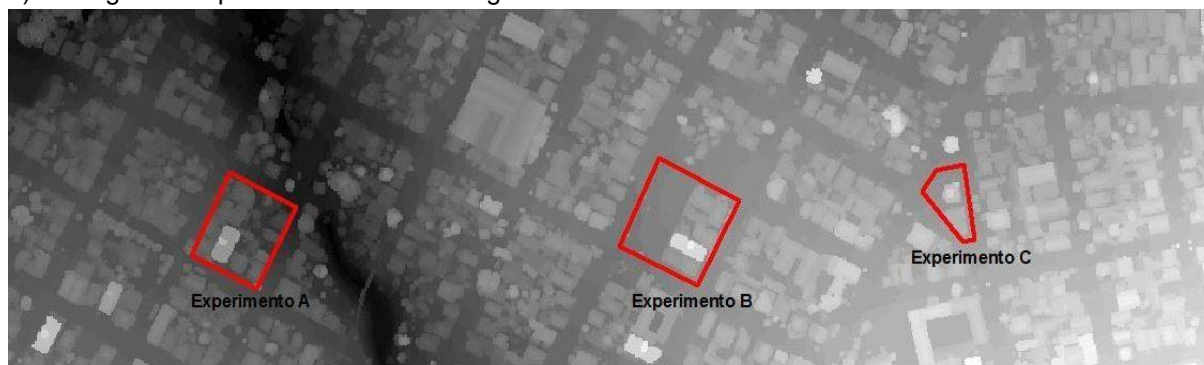
FIGURA 34 - MDS COM OS EXPERIMENTOS DA ÁREA DE ESTUDO 1

a) MDS gerado a partir dos dados do ALTM 2050





b) MDS gerado a partir dos dados do Pegasus HD500



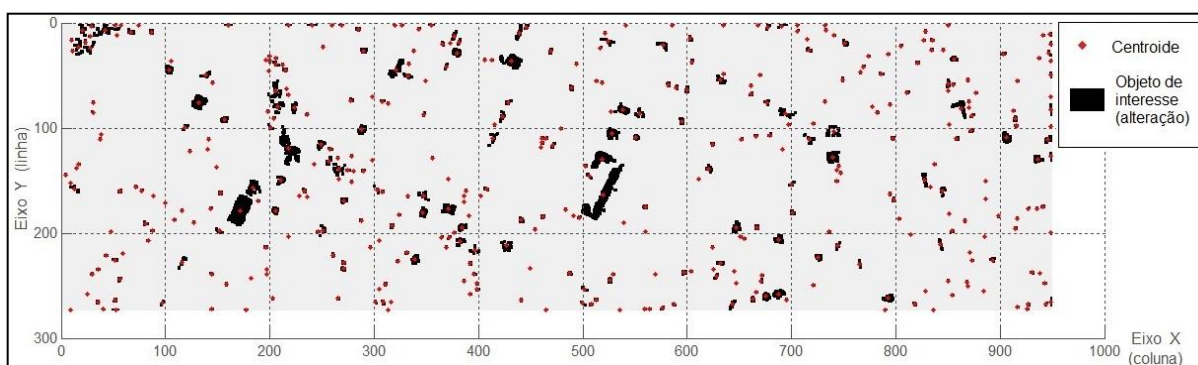
FONTE: O AUTOR (2016)

a) Posição e área dos objetos detectados em Ponta Grossa

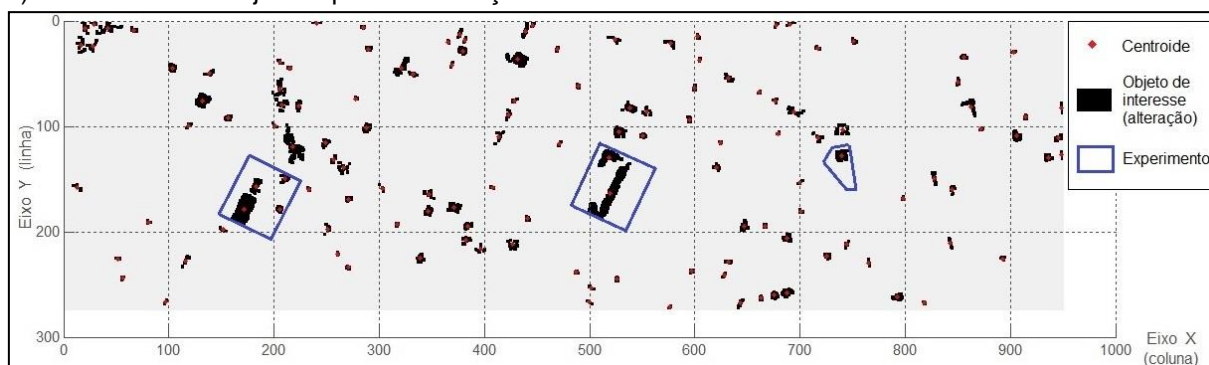
Com o processamento da imagem das alterações detectadas pelo método raster, foram obtidos os centróides dos objetos de interesse, neste caso as alterações detectadas, junto com suas respectivas formas e áreas. Para Ponta Grossa, inicialmente, foram rotulados 414 objetos, os quais são indicados na Figura 35a como pontos vermelhos. Após, foram eliminados os objetos que tivessem áreas menores que  $20 \text{ m}^2$ , totalizando-se 134 objetos de interesse como possíveis edificações/demolições. Na Figura 35b é mostrado este efeito de minimização da quantidade de objetos de interesse, sendo mais controlada a classificação e determinação de alterações.

FIGURA 35 - CENTRÓIDES DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 1

a) Centróides dos objetos antes da eliminação



## b) Centróides dos objetos após a eliminação



FONTE: O AUTOR (2016)

Os atributos de localização e área dos objetos de interesse identificados nos três experimentos de Ponta Grossa são apresentados na Tabela 19. Nestes experimentos, foram identificados sete objetos cujos centróides são dados em coordenadas imagem com suas correspondentes coordenadas cartográficas.

TABELA 19 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE POSIÇÃO E ÁREA OBTIDAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 1

Experimento	No. do objeto detectado	Centróide do objeto				Área [m <sup>2</sup> ]
		Coordenadas imagem [pixel]		Coordenadas UTM [m]		
		Coluna	Linha	X	Y	
Experimento A	1	172	178	583296,55	7225580,34	402
	2	183	156	583307,55	7225602,34	109
	3	213	150	583337,55	7225608,34	40
	4	206	179	583330,55	7225579,34	42
Experimento B	1	518	129	583642,55	7225629,34	193
	2	519	163	583643,55	7225595,34	557
Experimento C	1	739	127	583863,55	7225631,34	121

FONTE: O AUTOR (2016)

Com as coordenadas dos centróides dos objetos de interesse, foram estimadas as diferenças máximas de nível de cada objeto, identificando a coordenada Z na grade de diferenças. Estas alturas são apresentadas na Tabela 20 junto com a classificação definida para cada objeto.

TABELA 20 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE ALTURAS OBTIDAS PELO MÉTODO RASTER. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1

Experimento	No. do objeto detectado	Coordenadas UTM [m]		Diferença máxima de nível [m]	Tipo de Valores	Classificação
		X	Y			
Experimento A	1	583296,55	7225580,34	21,52	Positivos	Construção
	2	583307,55	7225602,34	5,67	Positivos	Construção
	3	583337,55	7225608,34	3,13	Positivos	Construção
	4	583330,55	7225579,34	-6,48	Negativos	Demolição
Experimento B	1	583642,55	7225606,34	-4,66	Negativos	Demolição
	2	583644,55	7225595,34	-4,08	Negativos	Demolição
Experimento C	1	583863,55	7225631,34	-5,25	Negativos	Demolição

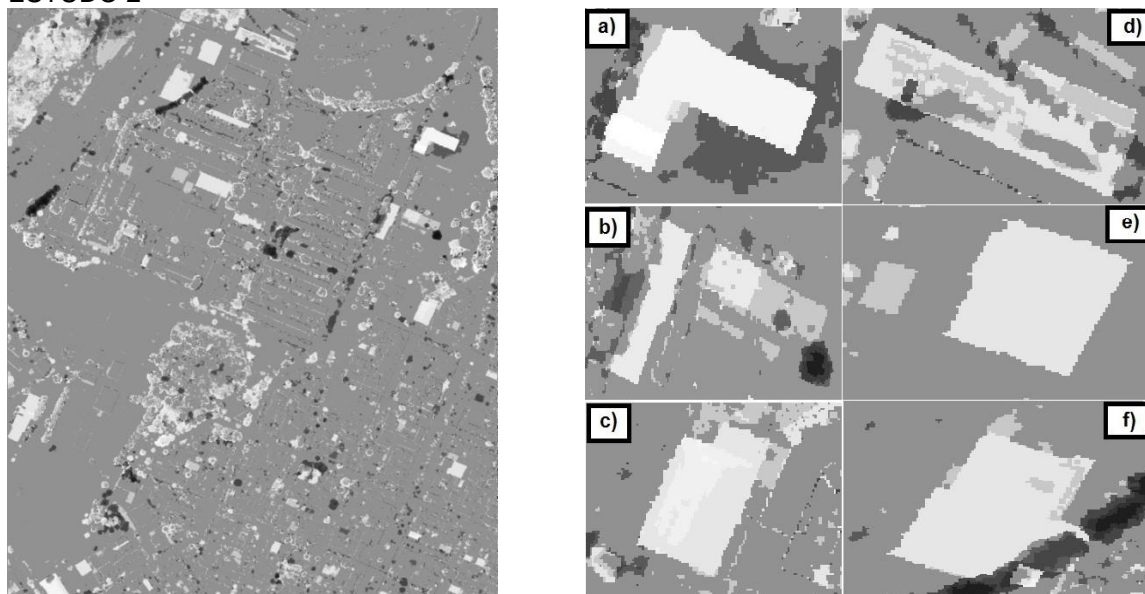
FONTE: O AUTOR (2016)

#### 5.2.1.2. Área de estudo 2. Centro Politécnico

A Figura 36 apresenta a imagem gerada da grade de diferenças para o Centro Politécnico com a ferramenta “*Compute Difference Map*”. A imagem representa as alterações detectadas, observando-se uma grande quantidade de alterações. Este fato pode ser explicado por, pelo menos, duas perspectivas: por um lado, a abrangência da área, como pode ser constatada na Tabela 10 (em 4.2.1) e, por outro lado, fato muito mais influente, devido ao considerável intervalo de tempo dos dados LIDAR utilizados (2003 – 2012, isto é, 9 anos de intervalo).

Assim como no caso de Ponta Grossa, com base na imagem gerada da grade de diferenças foram selecionadas algumas áreas para efetuar os experimentos do método vetorial nesta segunda área de estudo, a partir de algumas das alterações mais significativas em altura e/ou tamanho. Estas áreas são apresentadas nas janelas detalhadas (a), (b), (c), (d), (e) e (f) da Figura 36 para um total de seis experimentos e na imagem da grade de diferenças para Ponta Grossa gerada com a opção “*Compute Difference Map*” do software ENVI é apresentada na Figura 36 lado esquerdo.

FIGURA 36 - IMAGEM DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 2

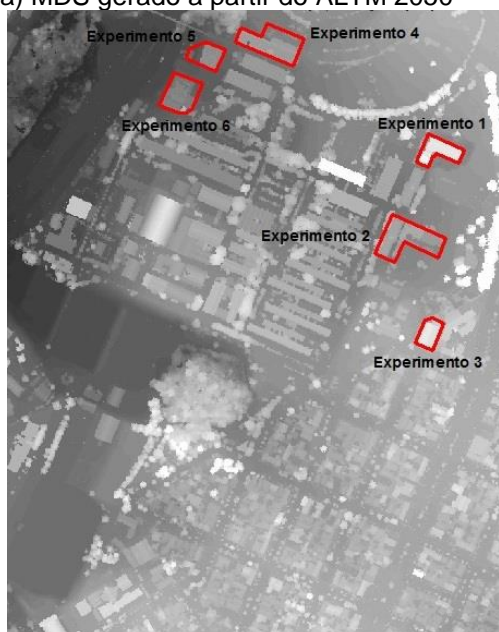


FONTE: O AUTOR (2016)

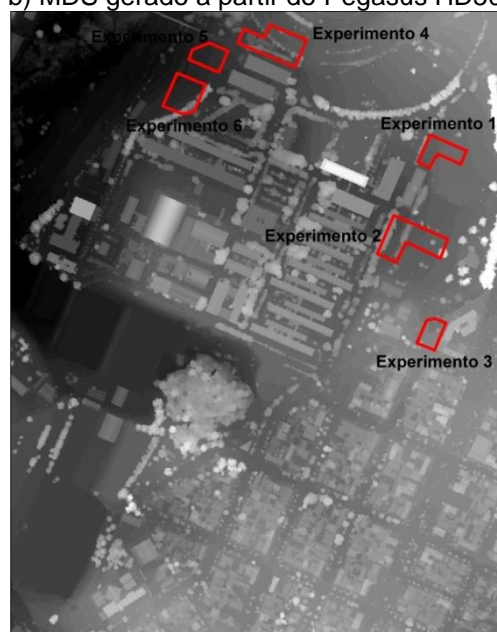
Nos MDS mostrados na Figura 37 são apresentados os experimentos selecionados. Nestes MDS são ressaltados estes experimentos como edificações singulares de acordo com as alterações mais relevantes dentro do campus Centro Politécnico, que correspondem com os experimentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

FIGURA 37 - MDS COM OS EXPERIMENTOS DA ÁREA DE ESTUDO 2.

a) MDS gerado a partir do ALTM 2050



b) MDS gerado a partir do Pegasus HD500



FONTE: O AUTOR (2016)

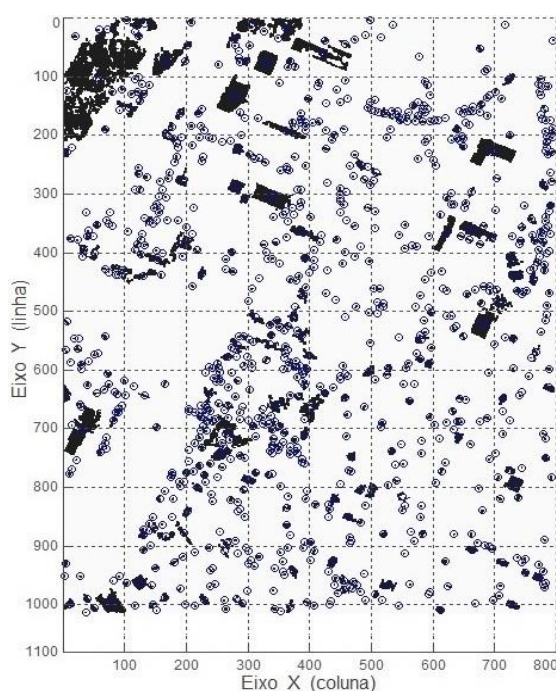


### a) Posição e área dos objetos detectados no Centro Politécnico

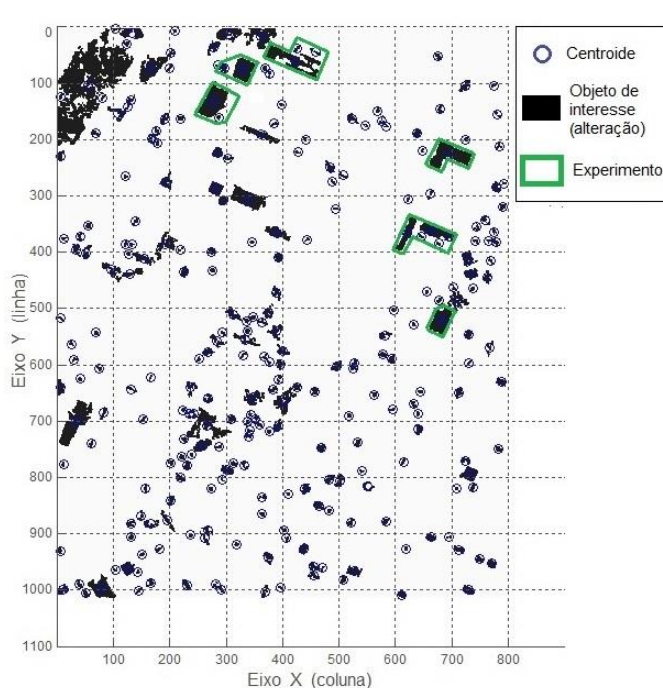
A imagem das alterações detectadas pelo método raster no Centro Politécnico, depois de efetuada a limiarização, da aplicação de filtros morfológicos e de serem determinados os centróides dos objetos de interesse, é apresentada na Figura 38. Porém, nesta área a quantidade de objetos identificados e rotulados foi consideravelmente maior que em Ponta Grossa, devido à grande quantidade de alterações detectadas como se evidência na imagem (a), sinalizadas com pequenas circunferências em azul. Por isto, para obter uma identificação das alterações nos experimentos e para uma melhor manipulação de escala e de interpretação da imagem, o limiar de remoção de objetos por área foi modificado na programação do processamento da imagem. Neste caso, foram removidos os objetos menores que  $40 \text{ m}^2$ . Na imagem (b) se apresenta o resultado do processamento da imagem após a eliminação destes objetos. No início foram identificados e rotulados 890 objetos (Figura a), os quais, após a remoção, totalizaram 262 objetos de interesse como possíveis edificações/demolições (imagem b).

FIGURA 38 - CENTRÓIDES DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 2

a) Centróides dos objetos antes da eliminação



b) Centróides dos objetos após a eliminação



FONTE: O AUTOR (2016)

Os atributos de localização e área dos 13 objetos de interesse (alterações) identificados para os seis experimentos, são apresentados na Tabela 21.

TABELA 21 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE POSIÇÃO E ÁREA OBTIDAS PELO MÉTODO RASTER. ÁREA DE ESTUDO 2

Experimento	No. objeto detectado	Centroide do objeto				Área [m <sup>2</sup> ]
		Coordenadas imagem [pixel]		Coordenadas UTM [m]		
		Coluna	Linha	X	Y	
Experimento 1	1	696	228	677877,26	7184018,30	1.806
Experimento 2	1	677	385	677858,26	7183861,30	41
	2	651	375	677832,26	7183871,30	92
	3	620	367	677801,26	7183879,30	789
	4	671	363	677852,26	7183883,30	984
Experimento 3	1	682	520	677863,26	7183726,30	1.224
Experimento 4	1	421	59	677602,26	7184187,30	1.817
	2	425	39	677606,26	7184207,30	64
	3	458	44	677639,26	7184202,30	87
Experimento 5	1	330	76	677511,26	7184170,30	1121
	2	297	73	677478,26	7184173,30	118
Experimento 6	1	277	133	677458,26	7184113,30	1.926
	2	286	161	677467,26	7184085,30	52

FONTE: O AUTOR (2016)

As diferenças máximas de nível são apresentadas na Tabela 22 junto com a classificação obtida a partir delas.

TABELA 22 - RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE ALTURA OBTIDA PELO MÉTODO RASTER. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2

Experimento	No. Edificação	Coordenadas UTM [m]		Diferença máxima de nível [m]	Tipo de Valores	Classificação
		X	Y			
Experimento 1	1	677845,26	7184008,30	23,35	Positivos	Construção
Experimento 2	1	677858,26	7183861,30	2,90	Positivos	Construção
	2	677827,26	7183873,30	3,79	Positivos	Construção
	3	677801,26	7183879,30	11,16	Positivos	Construção
	4	677862,66	7183869,10	-9,47	Negativos	Demolição
Experimento 3	1	677857,26	7183743,10	16,10	Positivos	Construção
Experimento 4	1	677605,86	7184181,10	11,24	Positivos	Construção
	2	677606,26	7184207,30	3,53	Positivos	Construção
	3	677639,26	7184202,30	3,38	Positivos	Construção
Experimento 5	1	677500,86	7184179,30	11,18	Positivos	Construção
	2	677478,26	7184173,30	5,49	Positivos	Construção
Experimento 6	1	677458,26	7184113,30	7,66	Positivos	Construção
	2	677466,66	7184082,10	16,55	Positivos	Construção

FONTE: O AUTOR (2016)

### 5.2.2. Alterações de edificações detectadas pelo método Direto

Nos resultados pelo método vetorial, assim como no método raster, as diferenças de nível classificaram as alterações em edificações novas e demolições. As análises dos resultados obtidos por este método estão dadas por três critérios:

- Pela classificação segundo as diferenças de nível.
- Pelo critério de identificar áreas maiores que 20 m<sup>2</sup>.
- Pela geometria que representa os polígonos das alterações em cada experimento. Assim, para geometrias regulares é possível identificar que se trata de edificações e não de outro tipo de objeto.

#### 5.2.2.1. Experimentos na área de estudo 1

As três áreas selecionadas para Ponta Grossa, denominadas “Experimentos A, B e C” são formadas por quadras, cujas principais estatísticas são apresentadas na Tabela 23. De acordo com esta Tabela, observa-se:

- a) O experimento A tem 1.103 pontos detectados com valores negativos (31,0% dos dados) que indicam demolições. Porém, a quantidade de pontos com valores positivos, 2.449 (68.95% dos dados) indica que nesta quadra foram maiores as construções.
- b) No experimento B os 3.567 pontos detectados com valores negativos (90,2% dos dados) definem as demolições, número bem acima dos 385 pontos detectados com valores positivos (9.7% dos dados).
- c) Para o experimento C foram detectados 680 pontos (84,0% dos dados) com valores negativos, quantidade maior que os 129 pontos com valores positivos (15.9% dos dados), sendo maior a quantidade de demolições.

TABELA 23 - ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS DO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1

Estatística	Experimento A	Experimento B	Experimento C
Pontos nuvem de referência	3.630	3.979	818
Pontos nuvem comparada	12.998	14.963	3.113
Pontos detectados	3.552	3.952	809
Média das distâncias [m]	5,59	-2,93	-2,33
Valores negativos	1.103	3.567	680
Valores positivos	2.449	385	129

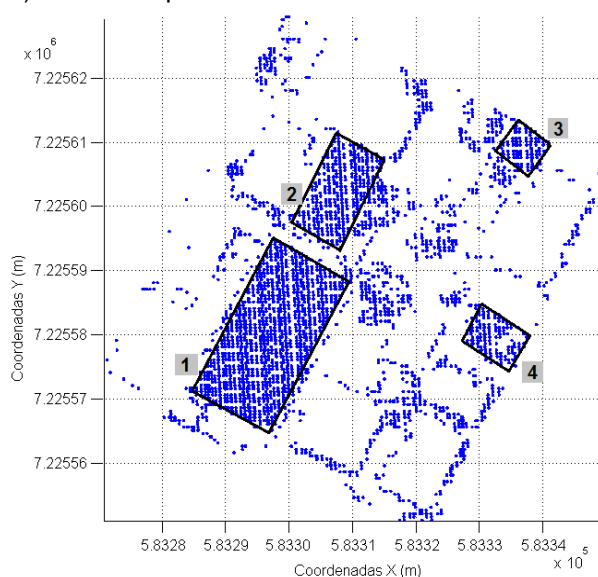
FONTE: O AUTOR (2016)

## a) Experimento A

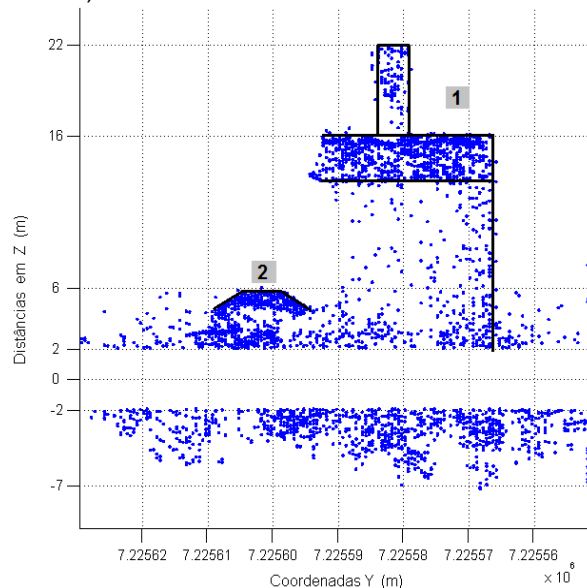
A distribuição dos pontos detectados está ilustrada em duas vistas na Figura 39. Na vista de topo estão ilustradas as alterações detectadas como possíveis edificações, ressaltadas nos polígonos pretos na ordem desde o número 1 até o número 4. Em quanto que na vista lateral se observam pontos detectados a uma altura aproximada de 22 m, que correspondem com a edificação com maior cota registrada. Também se observa uma aglomeração de pontos com altura de 6 m como outra possível construção. Estas formas de objetos são indicadas em linhas pretas correlacionadas com as edificações da vista superior. Por outro lado, os dados negativos apresentam valores de até -7 m com pontos dispersos.

FIGURA 39 - ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTO A

a) Vista de topo



b) Vista lateral



FONTE: O AUTOR (2016)

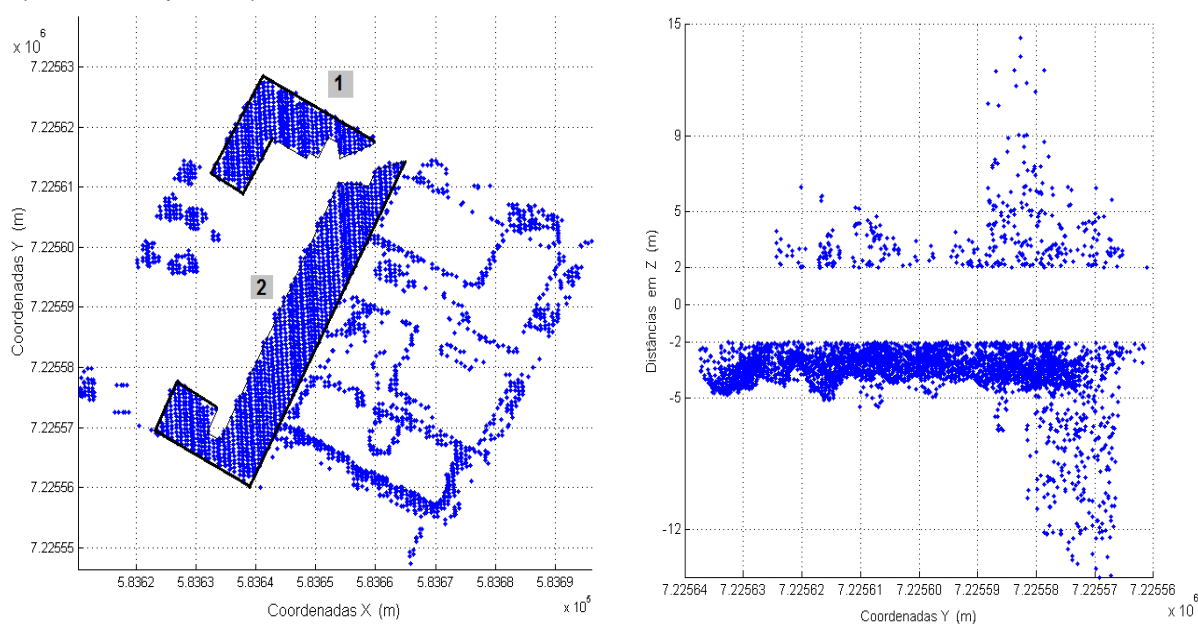


## a) Experimento B

A distribuição dos pontos detectados e apresentados em cor azul está ilustrada na Figura 40. Na vista de topo se observa em geral duas construções (polígonos pretos). Neste experimento e nesta vista é identificável a distribuição dos pontos nas bordas das edificações que exemplificam o comportamento do retorno do pulso neste tipo de feição. Na vista lateral as alterações se observam como pontos com alturas variáveis e dispersos no sentido positivo, enquanto que os pontos no sentido negativo apresentam um agrupamento importante na diferença de nível de - 5 m aproximadamente, embora tenha dados dispersos com valores de até -14 m.

FIGURA 40 - ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTO B

a) Vista de topo b) Vista lateral



FONTE: O AUTOR (2016)

## a) Experimento C

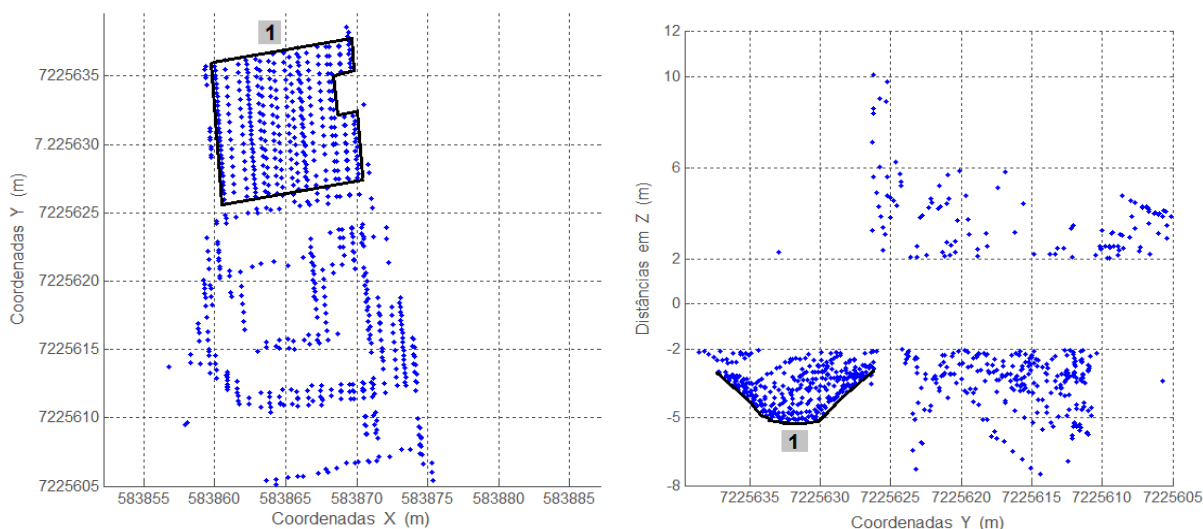
Na Figura 41 se observa a distribuição dos pontos segundo as vistas de topo e lateral. Na vista de topo evidencia uma única edificação (polígono preto), embora existam áreas com algum agrupamento de pontos que não atendem o critério de área maior que  $20 \text{ m}^2$ . Os dados positivos apresentam alguns pontos dispersos com uma altura máxima de 10 m que não podem ser identificados como uma edificação.

Nos dados negativos se observa um aglomerado de pontos com uma altura de -5 m aproximadamente, com uma clara forma convexa. Ao analisar suas coordenadas e compará-las com as da vista superior, percebe-se a possível Edificação 1.

FIGURA 41 - ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTO C

a) Vista de topo

b) Vista lateral



FONTE: O AUTOR (2016)

Para determinar as áreas das alterações detectadas como possíveis edificações/demolições realizou-se uma segmentação das quadras em função da geometria destas alterações. As áreas e a classificação das alterações dos experimentos A, B e C se apresentam na Tabela 24.

TABELA 24 - CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 1

Experimento	No. Edificação	Diferença máxima de nível [m]	Tipo de Valores	Área [m <sup>2</sup> ]	Classificação
Experimento A	1	21,83	Positivos	361,58	Construção
	2	5,74	Positivos	116,28	Construção
	3	3,19	Positivos	34,47	Construção
	4	-7,00	Negativos	31,56	Demolição
Experimento B	1	-4,93	Negativos	227,878	Demolição
	2	-4,83	Negativos	587,525	Demolição
Experimento C	1	-5,17	Negativos	103,88	Demolição

FONTE: O AUTOR (2016)

### 5.2.2.2. Experimentos na área de estudo 2

As estatísticas dos experimentos realizados na determinação de distâncias de ponto a plano para as seis áreas selecionadas para o Centro Politécnico encontram-se na Tabela 25. Os experimentos apresentam edificações singulares que refletem nos resultados do método diferenças de nível de forma tanto positivas como negativas. É importante ressaltar que embora os experimentos abranjam edificações singulares se apresentam dados negativos devido à influência da vegetação principalmente presente no contorno ou nos arredores das edificações escolhidas.

TABELA 25 - ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS DO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2

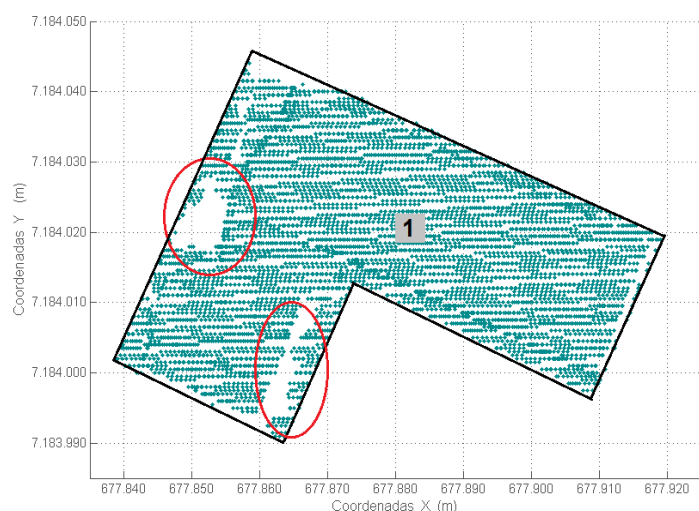
Estatística	Experimentos					
	1	2	3	4	5	6
Pontos nuvem de referência	10.100	6.246	6.586	11.129	8.169	4.682
Pontos nuvem comparada	6.798	11.338	3.840	9.634	4.625	6.690
Pontos detectados	6.135	7.451	3.216	6.284	3.100	5.860
Média das distâncias [m]	13,17	2,89	10,81	4,81	9,06	5,35
Valores positivos	5.189	5.690	3.195	5.584	3.100	5.101
Valores negativos	946	1.761	21	700	0	759

FONTE: O AUTOR (2016)

Em geral, os experimentos apresentam uma tendência de pontos detectados com valores positivos, equivalentes a 87% dos dados, em contrapartida com os valores negativos 13% dos dados, obtidos como possíveis pontos por vegetação e não identificados como demolições propriamente ditas. Então, os valores positivos, maiormente obtidos, permite classificar as alterações como edificações novas. A seguir, na Figura 42 se apresentam em vistas de topo os experimentos com a análise das alterações detectadas. Em geral, indicam-se os polígonos de cada uma das edificações detectadas em preto e as regiões sem informação indicados em circunferências de cor vermelha.

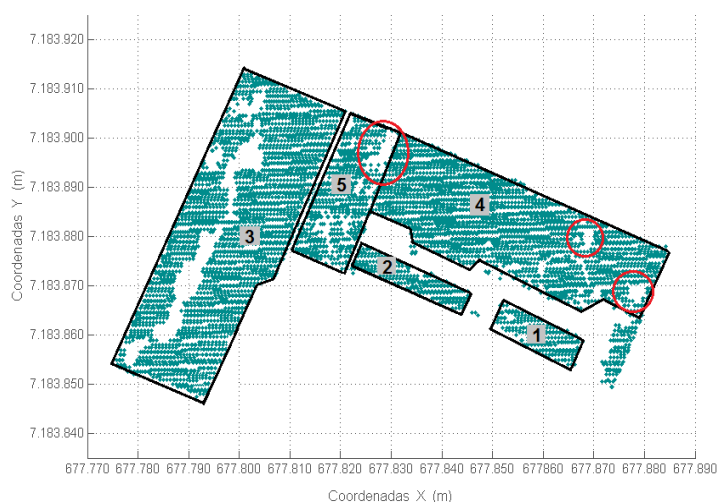
FIGURA 42 - VISTA DE TOPO DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2

a) Experimento 1



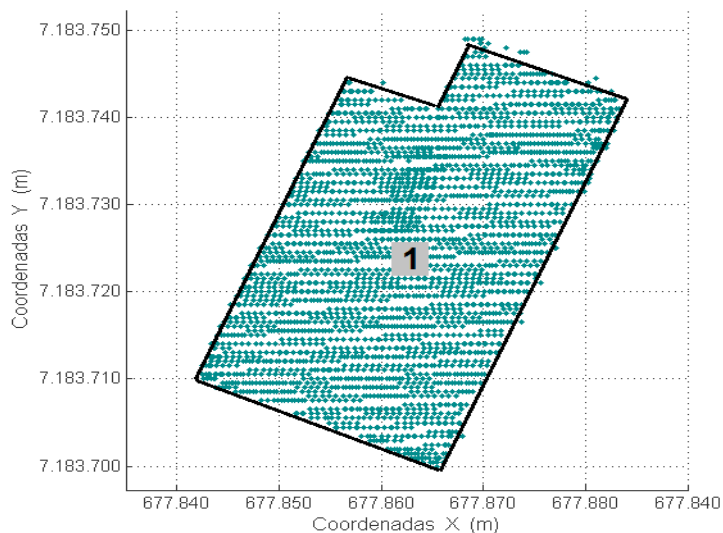
Apesar da geometria continua dos dados deste experimento, apresentam-se duas zonas com descontinuidades de dados; se observa uma feição com uma forma regular, que regra geral se estabelece como uma única possível edificação.

b) Experimento 2



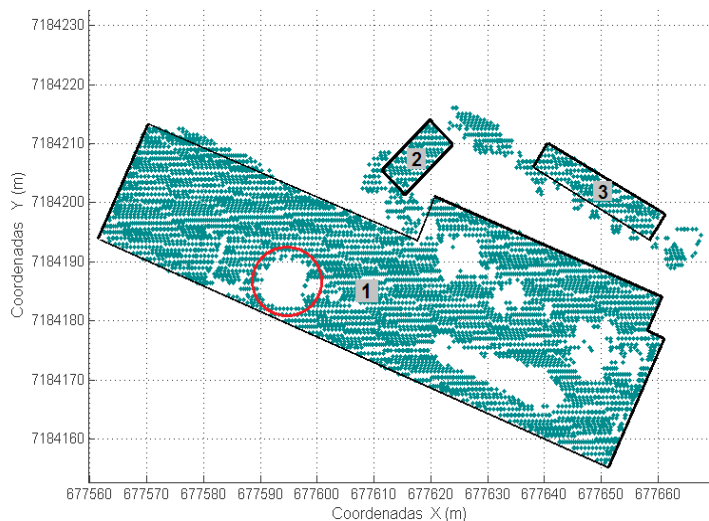
Os dados neste experimento amostram umas zonas com descontinuidades importantes. Não existe um padrão de forma continua e regular nos pontos em todo o objeto detectado pelo qual se determinaram cinco possíveis edificações.

c) Experimento 3



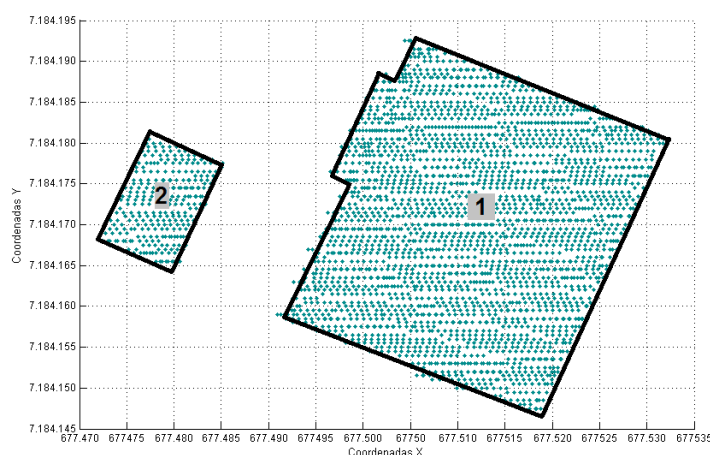
Os dados deste experimento retratam uma forma regular sem descontinuidades, sem problemas de bordas, pelo que se estabelece como uma única possível edificação.

## d) Experimento 4



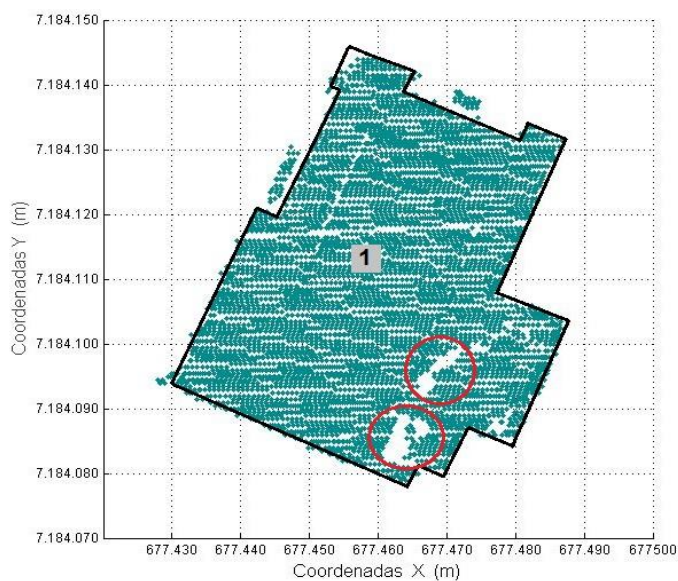
Os dados deste experimento, de forma idêntica ao experimento 2, apresentam serias discontinuidades, observáveis como buracos dentro da feição de análise. Porém, determinam-se de acordo com o observado, três possíveis edificações.

## e) Experimento 5



Os dados deste experimento indicam claramente duas áreas com geometria regular. Determinam-se assim, duas possíveis edificações.

## f) Experimento 6



A geometria dos dados deste experimento, embora apresente algumas discontinuidades, leva a considerar como uma única possível edificação pela forma regular da feição.

Para determinar as áreas das possíveis edificações, realizou-se uma segmentação, individualizando as alterações detectadas em cada experimento. A exclusão dos pontos não pertencentes às edificações, como os pertencentes a árvores, por exemplo, foi realizada a partir de perfis transversais e em conformidade com a coordenada de altura das feições. Atribuiu-se especial atenção aos experimentos em que não se identificam facilmente as edificações em função de descontinuidades e de formas irregulares nas bordas das edificações. As áreas das possíveis edificações são apresentadas na Tabela 26.

TABELA 26 - CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DETECTADAS PELO MÉTODO VETORIAL. EXPERIMENTOS NA ÁREA DE ESTUDO 2

Experimento	No. Edificação	Diferença máxima de nível [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Tipo de Valores	Classificação
Experimento 1	1	24,46	1.800,92	Positivos (97,7%)	Construção
Experimento 2	1	3,25	91,72	Positivos	Construção
	2	3,98	108,99	Positivos	Construção
	3	11,18	1.312,00	Positivos (98,6%)	Construção
	4	-10,5	840,62	Positivos (92,7%)	Construção
	5	-8,94	300,00	Negativos (82,8%)	Demolição
Experimento 3	1	16,61	1.100,71	Positivos	Construção
Experimento 4	1	11,52	2.374,02	Positivos (96,4%)	Construção
	2	4,07	59,99	Positivos	Construção
	3	3,65	100,20	Positivos	Construção
Experimento 5	1	11,39	1.080,40	Positivos	Construção
	2	5,65	118,74	Positivos	Construção
Experimento 6	1	16,61	2.010,00	Positivos (86,9%)	Construção

FONTE: O AUTOR (2016)

### 5.3. VERIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DE EDIFICAÇÕES

Na verificação da classificação realizada com inspeções de campo e apoiada por fotografias e ortoimagens, foi encontrado um tipo de edificação cujas características não são adequadas com as classificações predefinidas. Por isto foi necessário incluir uma nova tipificação denominada “construção temporária”. Para este trabalho se define construção temporária como: “construção transitória não residencial licenciada por tempo determinado que utilize materiais construtivos não caracterizados como materiais definitivos e de fácil remoção”.



Algumas das edificações com tais características encontradas nas áreas de estudo foram barracas e estufas. A partir deste fato, a classificação das alterações detectadas mudou, apresentando exclusão de elementos que não correspondiam com edificações como grupos de árvores derribados, por exemplo.

### 5.3.1. Edificações dos experimentos na área de estudo 1

Na Figura 43 se apresentam as aerofotografias conjuntamente tomadas nos levantamentos em Ponta Grossa ressaltando os experimentos realizados.

FIGURA 43 - AEROFOTOGRAFIAS DA ÁREA DE ESTUDO 1

a) Aerofotografia com o levantamento do ALTM 2050



b) Aerofotografia com o levantamento do Pegasus HD500



FONTE: O AUTOR (2016)

Ao final, na Tabela 27 se apresenta a verificação da classificação das edificações detectadas.

TABELA 27 - VERIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES. ÁREA DE ESTUDO 1

Experimento	No. Edificação	Construção nova	Demolição	Construção temporária
Experimento A	1	X		
	2	X		
	3	X		
Experimento B	1		X	
	2		X	
Experimento C	1			X
Total	6 Edificações	3	2	1

FONTE: O AUTOR (2016)

### 5.3.2. Edificações dos experimentos na área de estudo 2

Para o Centro Politécnico, apesar de serem tomadas fotografias no levantamento do Pegasus, não se conta com uma resolução adequada que permita verificar a classificação das alterações detectadas. Por este motivo, foi utilizada a imagem de intensidade gerada a partir do levantamento do ALTM 2050 no ano 2003 em comparação com uma ortoimagem da zona de estudo gerada em 08/2012 localizando e ressaltando as alterações (FIGURA 44).

FIGURA 44 - IMAGEM DE INTENSIDADE E ORTOFOTO DA ÁREA DE ESTUDO 2  
a) Imagem de intensidade 2003





## b) Ortoimagem 2012



FONTE: O AUTOR (2016)

Com a comparação das imagens anteriores, é possível observar que todos os objetos detectados correspondem com construções novas. Igualmente, com a verificação foi possível eliminar objetos não pertencentes a edificações como o objeto 2 do experimento 6 identificado no método raster (TABELAS 21 e 22) e o objeto 5 do experimento 2 identificado no método vetor (TABELA 26). Os resultados da área de estudo do Centro Politécnico são apresentados na Tabela 28.

TABELA 28 - VERIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES. ÁREA DE ESTUDO 2

Experimento	No. Edificação	Construção nova	Demolição	Construção temporária
Experimento 1	1	X		
Experimento 2	1			X
	2			X
	3	X		
Experimento 3	4	X		
	1	X		
Experimento 4	1	X		
	2			X
	3			X
Experimento 5	1	X		
	2			X
Experimento 6	1	X		
Total	12 Edificações	7	0	5

FONTE: O AUTOR (2016)

## 5.4. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

### 5.4.1. Comparação por altura das alterações das edificações

Os dados apresentados na Tabela 29 correspondem com as diferenças entre os métodos raster e vetor, avaliadas pela altura das edificações detectadas.

TABELA 29 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS POR ALTURA. EXPERIMENTOS NAS ÁREAS DE ESTUDO

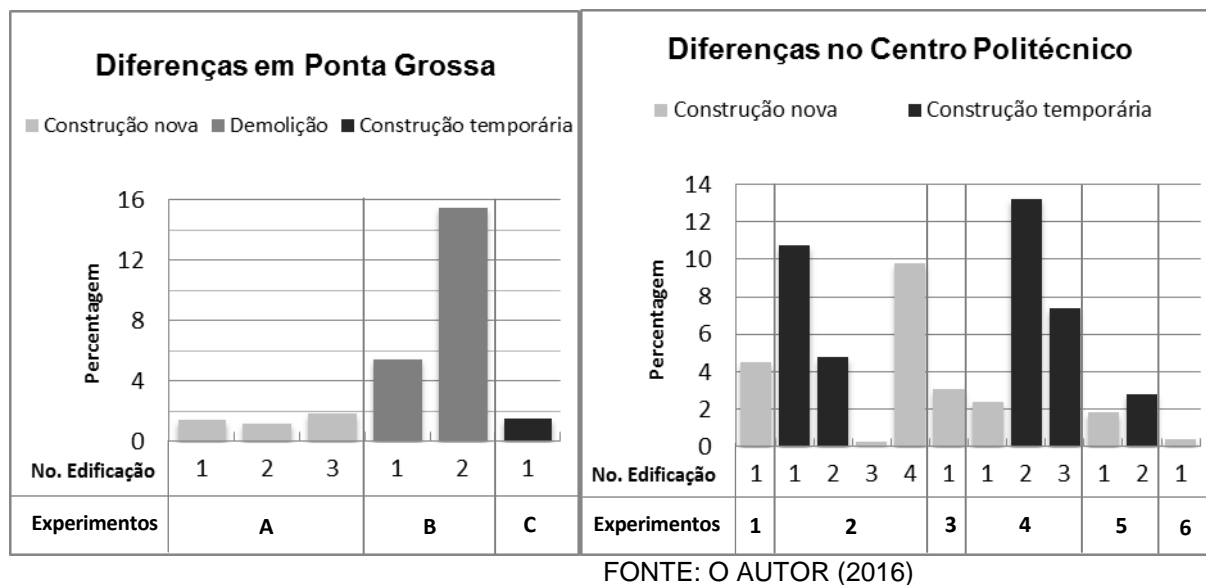
Área de Estudo	Experimento	No. Edificação	Classificação	Diferença máxima de nível [m]		Diferenças entre métodos	
				Método Raster	Método Direto	[m]	Porcentagem
1. Ponta Grossa	Experimento A	1	Construção nova	21,52	21,83	-0,31	1,42 %
		2	Construção nova	5,67	5,74	-0,07	1,22 %
		3	Construção nova	3,13	3,19	-0,06	1,88 %
	Experimento B	1	Demolição	-4,66	-4,93	0,27	5,48 %
		2	Demolição	-4,08	-4,83	0,75	15,53 %
	Experimento C	1	Construção temporária	-5,25	-5,17	-0,08	1,55 %
2. Centro Politécnico	Experimento 1	1	Construção nova	23,35	24,46	-1,11	4,54 %
	Experimento 2	1	Construção temporária	2,90	3,25	-0,35	10,77 %
		2	Construção temporária	3,79	3,98	-0,19	4,77 %
		3	Construção nova	11,16	11,18	-0,02	0,18 %
		4	Construção nova	-9,47	-10,50	1,03	9,81 %
	Experimento 3	1	Construção nova	16,10	16,61	-0,51	3,07 %
	Experimento 4	1	Construção nova	11,24	11,52	-0,28	2,43 %
		2	Construção temporária	3,53	4,07	-0,54	13,27 %
		3	Construção temporária	3,38	3,65	-0,27	7,40 %
	Experimento 5	1	Construção nova	11,18	11,39	-0,21	1,84 %
		2	Construção temporária	5,49	5,65	-0,16	2,83 %
	Experimento 6	1	Construção nova	16,55	16,61	-0,06	0,36 %

FONTE: O AUTOR (2016)

Pelo observado na Tabela 29, em Ponta Grossa a percentagem das diferenças entre os métodos para as edificações novas, é consideravelmente inferior que a percentagem para as edificações demolidas. Similarmente, a construção temporária tem uma percentagem de erro menor. No caso do Centro Politécnico, as diferenças tem um comportamento mais disperso.

Para ilustrar melhor estes fatos, apresenta-se no Gráfico 2 a comparação entre os métodos de estudo pelo atributo altura.

GRÁFICO 2 - DIFERENÇAS ENTRE OS MÉTODOS DE ESTUDO POR ALTURA



A partir do gráfico 2 se podem analisar as diferenças de altura entre os métodos de estudo da seguinte maneira: na área de estudo 1 dado que existem três tipos de edificações, as diferenças são percentualmente menores para os tipos “construção nova” e “temporária” que para o terceiro tipo “demolição”. Igualmente, na área de estudo 2 as diferenças têm uma tendência a serem menores em relação ao segundo tipo de edificação existente, as construções temporárias. Se bem é certo que na segunda área esta tendência não é tão marcada que na primeira, ao final se evidencia que as construções novas concordam em diferenças menores.

#### 5.4.1.1. Comparação com distâncias obtidas em *CloudCompare*

No software *CloudCompare* foi realizada a comparação entre as nuvens de pontos das áreas de estudo, utilizando para esta comparação o cálculo das distâncias de ponto a plano com o modelo de cômputo triangulação de Delaunay como opção selecionada na ferramenta do software “*Compute cloud/clouddistance*”.

Para as duas áreas foram obtidas as imagens em distâncias absolutas, as quais são apresentadas na Figura 45. De acordo com o observado em Ponta Grossa (imagem a), a região na sua maioria mantém tons homogêneos em cinza, o que permite concluir que foi uma área com pouca atividade construtiva. Enquanto que para o Centro Politécnico (imagem b), ilustra-se uma região com bastante atividade imobiliária. Além disto, nesta área é possível determinar que exista um aumento de altura na zona de floresta conforme o que se vê mais sobressaliente na parte superior esquerda da imagem.

FIGURA 45 - ALTERAÇÕES EM *CLOUDCOMPARE* DAS ÁREAS DE ESTUDO

a) Área de estudo 1.



Imagem resultante de Ponta Grossa com uma diferença de nível máxima registrada de 18,09 m.

b) Área de estudo 2.

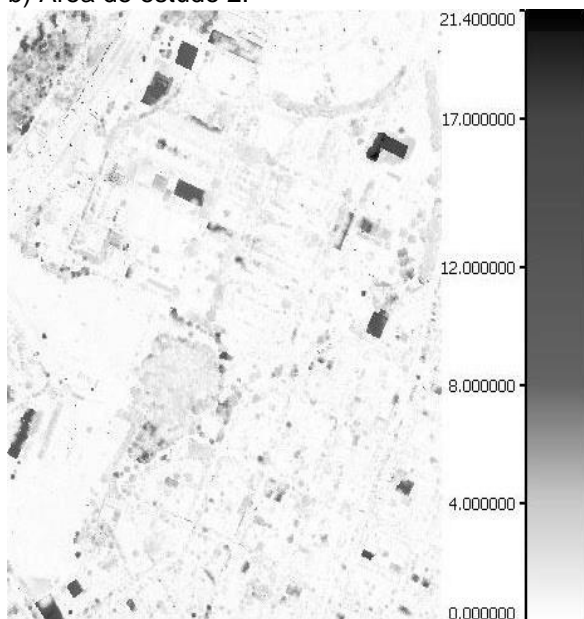


Imagem resultante do Centro Politécnico com uma diferença de nível máxima registrada de 21,32 m.

FONTE: O AUTOR (2016)

A comparação dos métodos propostos para este trabalho, junto com os resultados obtidos pelo software *CloudCompare* para o atributo altura é apresentada na Tabela 30. Os valores de altura dos dois métodos de estudo são mais elevados que os registrados no *CloudCompare*. Dessa maneira, o método direto resultou com maior discrepância que o método raster, em valores de altura nas duas áreas de estudo, comparados ambos com *CloudCompare*.

TABELA 30 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS POR ALTURA COM O SOFTWARE CLOUDCOMPARE

Área de estudo	Diferença máxima de nível registrada [m]			Diferenças entre Métodos e CloudCompare			
				Método Raster		Método Direto	
	Método Raster	Método Direto	<i>CloudCompare</i>	[m]	Porcentagem	[m]	Porcentagem
1. Ponta Grossa	21,52	21,83	18,09	3,43	18,97%	3,74	20,69%
2. Centro Politécnico	23,17	24,46	21,32	1,85	8,70%	3,14	14,75%

FONTE: O AUTOR (2016)

#### 5.4.2. Comparação por área das alterações das edificações

Na Tabela 31 se apresenta as comparações entre os métodos de estudo pelo atributo de área das edificações detectadas, onde se observam as diferenças de área entre os métodos com valores muito dispersos, mesmo com valores percentuais demasiado elevados. Nesse sentido, é importante determinar o erro na determinação destas áreas por meio da obtenção e comparação com as áreas “verdadeiras”.

TABELA 31 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS POR ÁREA. EXPERIMENTOS NAS ÁREAS DE ESTUDO

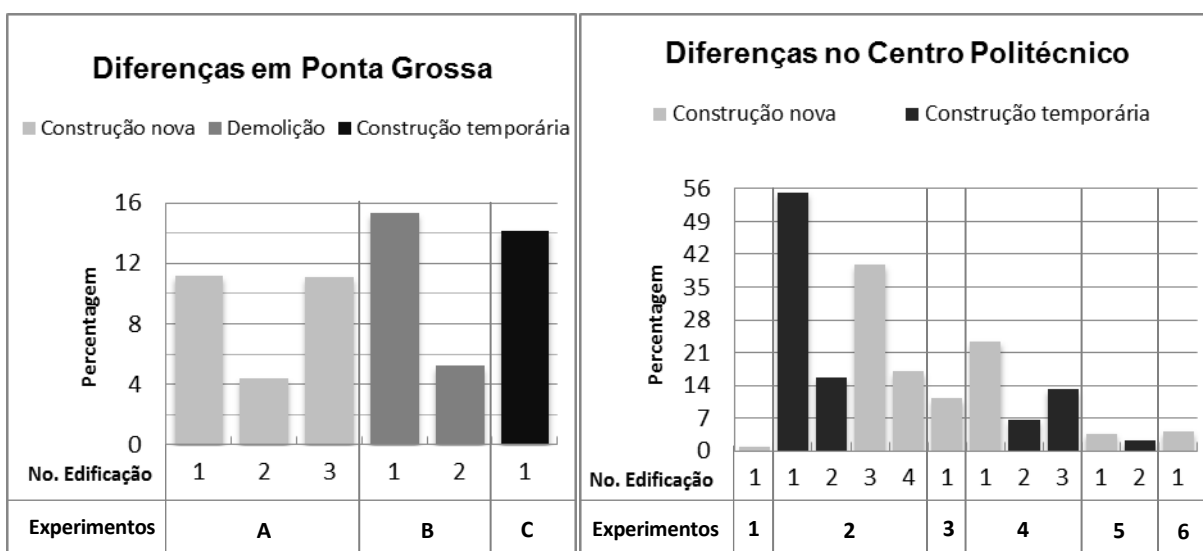
Área de Estudo	Experimento	No. Edificação	Classificação	Área [m <sup>2</sup> ]		Diferenças entre métodos	
				Método Raster	Método Direto	[m <sup>2</sup> ]	Porcentagem
1. Ponta Grossa	Experimento A	1	Construção nova	402	361,58	40,42	11,18%
		2	Construção nova	109	114,00	-5,00	4,39%
		3	Construção nova	40	36,00	4,00	11,11%
	Experimento B	1	Demolição	193	227,88	-34,88	15,31%
		2	Demolição	557	587,53	-30,53	5,20%
	Experimento C	1	Construção temporária	121	106,00	15,00	14,15%

Área de Estudo	Experimento	No. Edificação	Classificação	Área [m <sup>2</sup> ]		Diferenças entre métodos	
2. Centro Politécnico	Experimento 1	1	Construção nova	1.806	1.800,92	5,08	0,28%
	Experimento 2	1	Construção temporária	41	91,72	-50,72	55,30%
		2	Construção temporária	92	108,99	-16,99	15,59%
		3	Construção nova	789	1.312,00	-523,10	39,86%
		4	Construção nova	984	840,62	143,38	17,06%
	Experimento 3	1	Construção nova	1.224	1.100,71	123,29	11,20%
	Experimento 4	1	Construção nova	1.817	2.374,02	-557,02	23,46%
		2	Construção temporária	64	59,99	4,01	6,68%
		3	Construção temporária	87	100,20	-13,20	13,17%
	Experimento 5	1	Construção nova	1.121	1.080,40	40,60	3,76%
		2	Construção temporária	118	118,74	-0,74	0,62%
	Experimento 6	1	Construção nova	1.926	2.010,00	-84,00	4,18%

FONTE: O AUTOR (2016)

A partir da Tabela 31, observa-se que as variações são maiores para a área de estudo 2. Têm-se mais discordância, desde percentagens baixas como 0,28% até percentagens de 55,30%. Ponta Grossa mostra resultados mais homogêneos. Para melhor compreensão da tendência dos dados, no Gráfico 3 se apresenta o comportamento estatístico destes. Do gráfico 3 se pode concluir que a tendência das diferenças entre os métodos resulta menor para o tipo de edificação construção nova do que para as demolições e construções temporárias nas duas áreas de estudo.

GRÁFICO 3 - DIFERENÇAS ENTRE OS MÉTODOS DE ESTUDO POR ÁREA



FONTE: O AUTOR (2016)

Para determinar a acurácia das áreas nos métodos raster e vetor, foram obtidas as “áreas verdadeiras” das edificações dos experimentos na área de estudo 2, por levantamentos de campo e uma ortoimagem 2011. Estas áreas verdadeiras são apresentadas na Tabela 32 junto com a comparação dos métodos raster e vetor.

TABELA 32 - ÁREAS VERDADEIRAS PARA A ÁREA DE ESTUDO 2

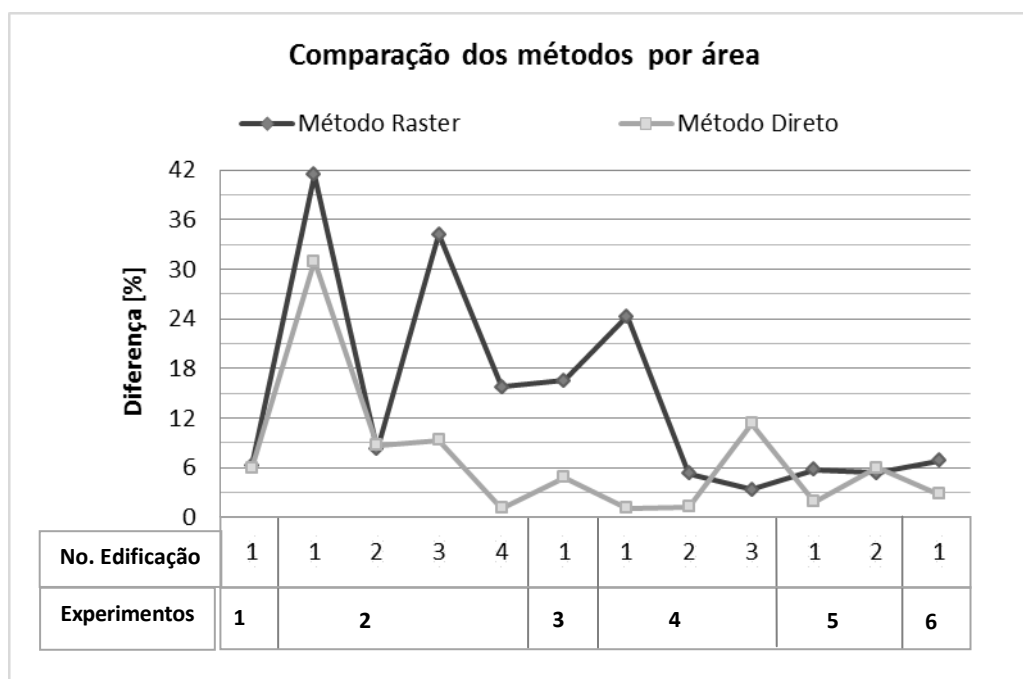
Experimento	No. Edificação	Área [m <sup>2</sup> ]			Diferença dos métodos com áreas verdadeiras			
		Método Raster	Método Direto	Verdadeira	Método Raster		Método Direto	
					[m <sup>2</sup> ]	Porcentagem	[m <sup>2</sup> ]	Porcentagem
Experimento 1	1	1.806	1.801	1.700	106	6,24%	101	5,94%
Experimento 2	1	41	92	70	-29	41,45%	22	30,97%
	2	92	109	100	-8	8,24%	9	8,71%
	3	789	1.312	1.200	-411	34,25%	112	9,33%
	4	984	841	850	134	15,76%	-9	1,10%
Experimento 3	1	1.224	1.101	1.050	174	16,57%	51	4,83%
Experimento 4	1	1.817	2.374	2.400	-583	24,29%	-26	1,08%
	2	64	60	60,77	3	5,32%	-1	1,28%
	3	87	100	90	-3	3,33%	10	11,33%
Experimento 5	1	1.121	1.080	1.060	61	5,75%	20	1,92%
	2	118	119	112	6	5,36%	7	6,02%
Experimento 6	1	1.926	2.010	2.068	-142	6,87%	-58	2,80%
Somatória		10.069	10.998	10.761	1.661	15%	426	4%
Media		839	917	897	138		35	

FONTE: O AUTOR (2016)

Ao comparar os resultados do método raster com respeito ao método vetor e apresentados na Tabela 32, se percebe de forma geral melhor acurácia das áreas obtidas pelo método vetor. Esta acurácia está determinada pela media obtida para as diferenças de área de cada método de estudo (calculada em função de valores absolutos para os valores das diferenças) comparada com as áreas verdadeiras, sendo de 138 m<sup>2</sup> do método raster em relação aos 35 m<sup>2</sup> do método direto, equivalentes a um 15% de erro no método raster vs um 4% de erro no método vetor.

No Gráfico 4 é analisada esta comparação para melhor ilustração da acurácia do método direto considerada anteriormente.

GRÁFICO 4 - DIFERENÇAS ENTRE AS ÁREAS OBTIDAS PELOS MÉTODOS DE ESTUDO E SUAS ÁREAS VERDADEIRAS. EXPERIMENTOS NO CENTRO POLITÉCNICO



FONTE: O AUTOR (2016)

Ao observar a curva de comportamento das diferenças entre os métodos com relação às áreas verdadeiras, o erro tem maior tendência a ser produzido no método raster. Existem duas ocasiões em que é menor a diferença do método raster com respeito às áreas verdadeiras: na edificação 3 do experimento 4 que corresponde com uma construção temporária e na edificação 2 do experimento 5 que igualmente corresponde com uma construção temporária. Dessa maneira, e tendo em conta as medias dos erros que têm uma proporção de 3 vezes menor para o método vetor, é possível concluir que o método direto se registra como um método mais acurado para determinar áreas de edificações.



## 6. CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Sobre a temática das classificações, encontrar métodos que realizem de forma automática processos como a classificação das alterações das edificações detectadas se vê minimizado porque a classificação neste trabalho resultou com processos de inspeção manual e incluso com levantamentos de campo. Quando houver problemas de oclusão, a verificação deve ser realizada de maneira pontual para cada edificação que apresente estas características. O maior desafio está associado a elementos/objetos temporários como barracas. Este tipo de elemento pode levar a classificação errada de alterações detectadas em ambientes urbanos. Nas demolições, as mudanças de vegetação densa e de árvores com altura considerável influem na determinação desta classe, muitas vezes confundível.

Ao avaliar a acurácia dos métodos pela comparação dos atributos geométricos, resulta evidente uma discrepância nas áreas ao realizar o processamento das imagens. Esta discrepância não se origina na detecção por subtração dos MDS, mas foi no processamento das imagens, sendo muito menos acurados os resultados para o centro Politécnico que para a Cidade de Ponta Grossa. É importante considerar que os dados calculados pelo método raster apresentam discrepâncias por serem dados de alturas ajustadas ao serem preenchidos os valores das células vazias nas grades para as regiões em que o feixe laser não atinge. Depois, os erros derivados do tratamento das imagens ao aplicar filtros morfológicos aumentam ainda mais as discrepâncias em áreas. Analisando o observado nos resultados dos métodos com respeito ao tamanho, a tendência no método raster é a de aumentar as áreas. Em consequência, no processamento das imagens o processo de dilatação deve ser analisado na determinação deste atributo.

Pelo anterior, a detecção de alterações com transformação dos dados em formatos raster não resulta apropriada para determinação de atributos de forma e tamanho de maneira acurada, sendo assim necessário procurar outra técnica de automatizar a determinação de áreas. Porém, ao comparar os dois métodos sob o ponto de vista prático, uma grande vantagem do método raster é a otimização do tempo de cômputo, dado que o processamento de dados distribuídos irregularmente tais como os dados obtidos pelos sistemas LIDAR, requer mais tempo que o processamento de dados efetuado sobre uma grade regular retangular.

A percentagem das diferenças entre os métodos de determinação de área aumenta consideravelmente comparada com os de diferenças por altura. Este dado atípico pode ser avaliado pelo tipo de edificação: as edificações com problemas de oclusão por presença de árvores nas bordas, por exemplo, onde as árvores podem alcançar até a metade do telhado de uma edificação.

Sabe-se que os dados LIDAR não detectam com precisão bordas de edificações. Este fato pode ser agravado quando da existência de árvores nas vizinhanças de edificações, o que faz com que a geometria destas últimas fique modificada, gerando formas irregulares. Neste caso, a tendência no cálculo de áreas é a superestimativa. Assim, para determinar com acurácia as áreas das edificações com problemas de oclusão deve-se considerar separar a vegetação de construções para se ter maior sucesso. Em geral, os sensores LIDAR apresentam uma precisão altimétrica válida para detectar alterações de edificações.

Recomenda-se a remoção da vegetação, por filtragem, previamente à geração da grade de diferenças. Dado que a vegetação implica em um dos maiores problemas na determinação de alturas, a eliminação desta, realizada por programas, deve trazer considerável melhoria no automatismo de cômputo de atributos de edificações.

Também um planejamento de voos transversais com recobrimento lateral de edificações é uma opção para aumentar as informações sobre as edificações. Os levantamentos LIDAR com várias linhas de voo em diferentes direções, sem considerar as diferenças nos parâmetros, pode ajudar no recobrimento das regiões onde o feixe laser não atinge os alvos e assim obter uma cobertura das edificações muito mais ampla.

Recomenda-se adaptar a presente metodologia para fins de levantamentos maiores, focada em atualizações imobiliárias que determinem o atributo de volume das edificações, como avanço para uma abordagem 3D dos dados espaciais em uma visão cadastral.

## 7. REFERÊNCIAS

ARAKI H. **Fusão de informações espectrais, altimétricas e de dados auxiliares na classificação de imagens de alta resolução especial.** 136 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BALTSAVIAS, E. P. **Airborne Laser scanning: basic relations and formulas.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 54 (1999), 199 – 214.

BALTSAVIAS, E. P. **Introduction to Airborne LiDAR and Physical Principles of LiDAR Technology.** International School on LiDAR Technology, ITT Kanpur, Índia. 31 March - 4 April. 2008.

BOTELHO, M. F. **Modelagem tridimensional de edificações usando dados do sistema laser scanner e imagem orbital de alta resolução espacial.** 144p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BOULOS, P.; CAMARGO, I. **Geometria Analítica: Um tratamento vetorial.** Editora McGraw-Hill Ltda. 2a Edição. São Pulo. 1987.

BRADEN, BART. **The surveyor's area formula.** The College Mathematics Journal. Vol. 17, No. 4. p. 326-337. 1986. Published by: Mathematical Association of America.

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a laser: Comparação com Métodos Fotogramétricos.** XX Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio Grande do Sul. 2002.

BRIESE, C.; PFEIFER, N. **Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models.** Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. In Fifth Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, 2001.

CENTENO, J. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

CENTENO, J. S.; MITISHITA, E. A. **Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR.** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, p. 3645-3652. Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007.

CLOUDCOMPARE. **User manual.** Versão 2.6.1. França 2015.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing.** Second Edition. Prentice Hall. New Yersey. 2002.

HEBEL, M.; ARENS, M.; STILLA, U. **Change Detection in Urban Areas by Direct Comparison of Multi-view and Multi-temporal ALS Data.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011.

KORZENIOWSKA, K.; PFEIFER N. **3D Building Change Detection on the basis of Airborne Laser Scanning Data**. AGILE 2014 – Castellón, June 3-6, 2014.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica ALS80. Airborne Laser Scanners Performance for every Application**. Brochure. Heerbrugg, Switzerland. 2015.

MACHADO, A. M. **Extração automática de contornos de edificações com LiDAR**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 201p. 2006.

MAS, J. F. **Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques**. 1999. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, no. 1, 139 - 152. 1999.

MITISHITA, E. A. **Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica C.A.D., para fins de mapeamento na área florestal**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 278p. 1997.

MURAKAMI, H.; NAKAGAWA K.; HASEGAWA H.; SHIBATA T.; IWANAMI E. **Change detection of buildings using an airborne laser scanner**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 54 (1999), 148 – 152.

NAMIKAWA, L.; FELGUEIRAS C.A.; MURA J.C.; ROSIM S.; LOPES E. S. **Modelagem numérica de terreno e aplicações**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. INPE-9900-PUD/129, São José dos Campos, 2003.

OPTECH INC. **Airborne Laser Terrain Mapper ALTM 2050. The Ultimate in Performance**. Canada. 2002a.

OPTECH INC. **Airborne Laser Terrain Mapper ALTM 2050. Airborne Operations Manual**. Toronto, Ontario, Canada. 2002b.

OPTECH INC. **Airborne Laser Terrain Mapper Pegasus HD500. Survey Operation Manual**. Vaughan, Ontario, Canada. 2012.

OPTECH INC. **PEGASUS HD500. Summary Specification Sheet**. Brochure. Vaughan, Ontario, Canada. 2015.

ROTTENSTEINER, F. **Building change detection from digital surface models and multi-spectral images**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 36, 145–150. 2007.

RUTZINGER, M.; RÜF B.; HÖFLE B., VETTER M. **Change detection of building footprints from airborne laser scanning acquired in short time intervals**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 38, 475 - 480, 2010.

RYMASHEUSKAYA, M. **Land Cover Change Detection in Northern Belarus**. In The 11th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science. Proceedings ScanGIS'2007, p. 255-260. 5 a 7 de setembro, Norway, 2007.

SCHAER, P. **In-flight Quality Assessment and Data Processing for Airborne Laser Scanning**. Geological and geophysical work in Switzerland. Institute of Geodesy and Photogrammetry. Volume 79. Switzerland. 2010.

SILVA, B. R. A. **Sistema de contagem automática de objetos utilizando processamento digital de imagens em dispositivos móveis**. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, Brasil 2014.

SILVA, C.; LIESENBERG V.; KLAUBERG C.; HUDAK, A.; LIEBERMANN, R.; RODRIGUES L. **Influência da interpolação na geração de MDTs a partir de pontos classificados LiDAR**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, p. 6105-6112. Foz do Iguaçu, Brasil. 13 - 18 abril 2013.

STEINBRUCH, A.; WINTERLE P. **Geometria Analítica**. Makron Books Editora Ltda, Segunda Edição. São Paulo, 1987.

TERRASOLID LIMITED. **TerraScan User Guide**. Dayton, Ohio. USA. 2000.

TERRASOLID LIMITED. **Terramodel User Guide**. Version 7. Dayton, Ohio. USA. 2002.

TOTH, C. **The State of the Art in Airborne Data Collection Systems – Focused on LiDAR and Optical Imagery**. LARS - Latin American Remote Sensing Week. Santiago – Chile. 2010.

VÖGTLE, T.; STEINLE, E. **Detection and recognition of changes in building geometry derived from multi-temporal laser scanning data**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Spat. Inf. Sci. 34, 428–433, 2004.

WAGNER, W.; ULLRICH, A.; MELZER, T.; BRIESE, C.; KRAUS, K. **From Single-Pulse to Full-Waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 35, No. Part B, 2004.

XU, S.; VOSSELMAN, G.; OUDE ELBERINK S. **Detection and classification of changes in buildings from Airborne Laser Scanning data**. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Workshop Laser Scanning, Antalya, Turkey, 2013.

XU, S.; VOSSELMAN, G.; OUDE ELBERINK S. **Detection and classification of changes in buildings from Airborne Laser Scanning data**. Remote Sensing. 7, 17051–17076, 2015.